

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В КРУПНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

Любимова Т. П., Паршакова Я. Н.

MODELING PROPAGATION OF THERMAL POLLUTION IN LARGE WATER BODIES

Lyubimova T. P., Parshakova Ya. N.

Аннотация

Введение: работа посвящена изучению распространения тепловых загрязнений, созданных в результате отвода нагретой воды с тепловых электростанций, использующих прямоточную систему охлаждения, в крупных водных объектах. В прибрежных зонах, таких как устья рек, где водообмен ограничен масштабами водоема-приемника, сброс подогретой воды от промышленных объектов и электростанций может приводить к значительному повышению температуры воды. Это влияет на состояние флоры и фауны и угрожает жизнедеятельности живых организмов в воде. По этой причине важно оценить влияние нагретых водных масс в зависимости от метеорологических и технологических условий. **Методы:** в работе рассматривается пример работы Пермской ТЭЦ (Пермская ГРЭС), которая является одной из крупнейших тепловых электростанций в Европе. Исследование проводится для различных антропогенных и метеорологических условий. Поскольку вертикальное распределение температуры в таких резервуарах очень неоднородно, расчеты выполняются в рамках трехмерной модели. Метод расчетов основан на k - ε модели турбулентности с учетом плавучести, связанной с зависимостью плотности жидкости от температуры. **Результаты:** проведен расчет влияния ветра переменного направления для наиболее неблагоприятных условий как по экологическим, так и по технологическим показателям. Анализ результатов численного моделирования показал, что вблизи поверхности структура потока достаточно равномерна и определяется, главным образом, ветровым воздействием. Наблюдается значительное расслоение подогретых вод по глубине. Толщина слоя воздействия подогретых вод составляет 4–6 метров. **Заключение:** результаты расчетов актуальны для оценки тепловых загрязнений при работе тепловых электростанций, использующих прямоточную систему охлаждения.

Ключевые слова: крупные водные объекты, тепловые загрязнения, трехмерное численное моделирование, k - ε модель турбулентности.

Введение

В настоящее время взаимосвязь между энергетическими и водными ресурсами находится на переднем крае исследований. Быстрое развитие

Abstract

Introduction: The study analyzes propagation of thermal pollution, resulting from removal of heated water from thermal power plants using a direct cooling system, in large water bodies. In coastal areas (e.g. river mouths), where water exchange is limited to the scale of a receiving reservoir, the discharge of heated water from industrial facilities and power plants can lead to a significant increase in water temperature. Such increase affects the state of flora and fauna and threatens the vital activity of living organisms in the water. Therefore, it is important to assess the effect of heated water masses depending on meteorological and technological conditions. **Methods:** The paper reviews a case study of the Perm CHP (Permskaya TPP) — one of the largest thermal power plants in Europe. Various anthropogenic and meteorological conditions are considered. Since the vertical temperature distribution in such water bodies is very inhomogeneous, the calculations are performed within a three-dimensional model. The calculation method is based on the k - ε turbulence model, with account for the buoyancy related to the dependence of the fluid density on temperature. **Results:** The effect of variable wind is calculated for the most unfavorable conditions in terms of both environmental and technological indicators. According to the analysis of the results of numerical simulation, the flow structure near the surface is fairly uniform and determined mainly by the wind effect. Significant non-uniformity of heated water at varying depths is observed. The thickness of the layer of heated water making impact is 4–6 m. **Conclusion:** The results of calculations are relevant for assessment of pollution during operation of thermal power plants using a direct cooling system.

Keywords: large water bodies, thermal pollution, 3D numerical simulation, k - ε turbulence model.

промышленного сектора привело к увеличению спроса на электроэнергию. Это связано с реконструкцией существующих и созданием новых тепловых и атомных электростанций, а также

расширением мощности и значительным увеличением объема охлаждающей воды, необходимой для эксплуатации энергоблоков на электростанциях. Из-за экономической составляющей и по соображениям безопасности большинство электростанций расположены в прибрежной зоне. На этих электростанциях используются системы постоянного водотока, в которых вода извлекается непосредственно из резервуаров, которые действуют как охладители. Как следствие, тепловой шлейф, нагретый до высоких температур на электростанциях, истекает непосредственно в резервуар [9, 14]. Огромное количество тепла, переносимого термальной водой, сбрасывается в приемный резервуар, тем самым увеличивая естественную температуру принимающей воды, которая оказывает прямое или косвенное воздействие на экологическую среду [3]. По этой причине в настоящее время взаимосвязь между энергетическими и водными ресурсами является актуальной проблемой, рассматриваемой многими научными и государственными учреждениями [2, 5, 16, 18, 19]. В настоящей работе рассматривается сброс отработанной тепловой воды в водоем-приемник на примере работы Пермской ГРЭС, расположенной в Пермском крае, г. Добрянка. Исследование проводится для различных антропогенных и метеорологических условий. По определению допустимых значений выбросов в водные объекты с рыбным хозяйством, таких как Камское водохранилище, в рамках утвержденных нормативных документов температура в летний период не может быть выше 28 °С, а разница между фоновой температурой самого водного объекта и температурой водных масс, поступающих извне, не может быть выше 5 °С. Одновременно с этим, в соответствии с документом «Гигиенические требования к охране поверхностных вод» СанПиН 2.1.5.980–00, утверждены нормы к качеству воды для рекреационных целей: «летняя температура воды в результате сброса сточных вод не должна повышаться более чем на 3 °С по сравнению со средней температурой воды самого жаркого месяца года за предыдущие 10 лет».

В настоящее время для решения проблем термического загрязнения используются различные методы исследования. Тепловое пятно, возникшее от береговых электростанций, обычно кон-

тролируется путем измерения температуры воды в точках наблюдения. Хотя результаты этих измерений высокоточные, этот метод требует больших ресурсов, поскольку размер выборки ограничен, и доступны только дискретные данные, которые не могут отражать пространственное изменение эффекта теплового шлейфа [20]. Важным методом исследования является численное моделирование, которое необходимо для понимания эффектов, которые оказывают термоэлектрические установки на окружающую среду [4, 14].

Вычислительные аспекты моделей турбулентности при описании тепловых потоков приведены в работах [6, 17]. Трехмерное численное моделирование турбулентного смешения водных масс с разными температурами проводилось в [7, 11, 15] на основе решения уравнений Навье-Стокса и моделей турбулентности. Расчеты выполнялись с распараллеливанием. Получена зависимость времени вычисления от числа узлов сетки и процессоров.

Авторами настоящей работы разработаны гидродинамические модели поверхностных водных объектов, основанные на трехмерном численном моделировании [10, 12, 13, 14].

Поскольку наиболее значительные зоны рекреации (г. Добрянка) расположены к югу от ГРЭС, то необходимо в первую очередь оценить размеры зон теплового загрязнения для различных режимов ГРЭС при северном ветре, так как при нем наиболее вероятно воздействие теплового загрязнения на эти зоны.

В то же время существенное значение представляет оценка возможности и масштабов попадания сбрасываемых термальных стоков в подводящий канал. Наряду с проведением расчетов при северном направлении ветра необходимо проведение расчетов при южном ветре, когда наиболее велика вероятность попадания сбрасываемых стоков в подводящий канал. Поскольку процессы формирования зон теплового загрязнения в водохранилище весьма инертны, расчеты должны проводиться при скорости ветра, характеризующейся значительной повторяемостью и продолжительностью. В настоящей работе представлены результаты моделирования для ветра переменного направления, когда в течение суток ветер был северным и после этого поменял направление на противоположное, в течение сле-

дующих двух расчетных суток наблюдалось воздействие южного ветра.

Материалы и методы

Пермская ГРЭС расположена на Камском водохранилище в 5 км от города Добрянка. Для охлаждения в рабочем цикле станции используется холодная вода, забираемая из Камского водохранилища с помощью подводящего канала. Теплая отработанная вода сбрасывается через отводящий канал непосредственно в Камское водохранилище (рис. 1). По техническому проекту, утвержденному в 1978 году, на Пермской ГРЭС в эксплуатацию введены три паросиловых энергоблока в период с 1986 по 1991 г. [1]. В июле 2017 года на базе парогазовой установки ПГУ-800 в эксплуатацию введен четвертый энергоблок. Таким образом, установленная электрическая мощность составляет 3363 МВт: три паросиловых энергоблока мощностью 820 МВт каждый, один — парогазовый мощностью 903 МВт.

Средние глубины участка Камского водохранилища в зоне расположения Пермской ГРЭС представляют собой 4–7 метров, поэтому по

морфометрическим характеристикам эта зона является относительно мелководной. Из Камского водохранилища вода для охлаждения поступает через канал, длина которого составляет 2,3 км. Отработанная вода сбрасывается через отводящий канал длиной 0,9 км. Ширина водохранилища составляет около 4 км. У противоположного от Пермской ГРЭС берега имеется затопленное русло р. Камы, в котором максимальные глубины составляют 23 м (рис. 2).

Границы участка, для которого проводилось численное моделирование, показаны на рис. 2 красными линиями.

Численный эксперимент по изучению динамики тепловых загрязнений в районе Камского водохранилища в процессе сброса отработанной воды от Пермской ГРЭС проводился в рамках трехмерного подхода. Рассматривался участок длиной более 11 км. Вычислительная область включала подводящий канал и предназначенный

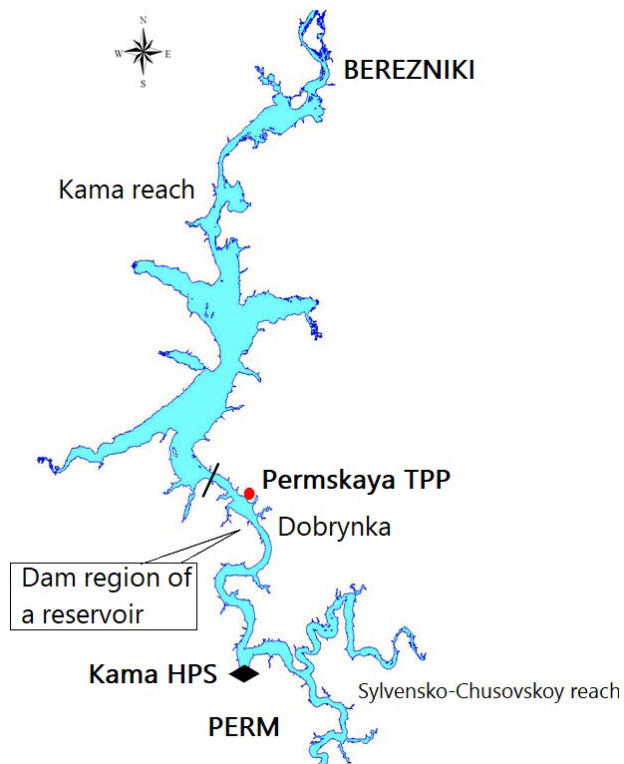


Рис. 1. Общая схема расположения Пермской ГРЭС. Камское водохранилище

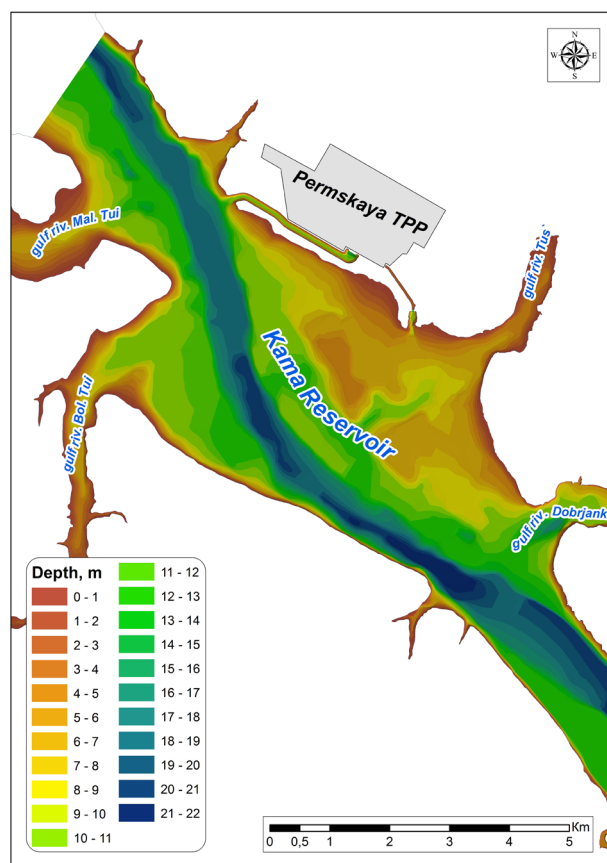


Рис. 2. Карта расположения Пермской ГРЭС. Морфология дна Камского водохранилища. Красными линиями ограничена вычислительная область

для сброса отработанной подогретой воды отводящий канал. Расчеты проводились при помощи вычислительного гидродинамического пакета ANSYS Fluent. Для моделирования турбулентных потоков использовалась $k-\varepsilon$ модель турбулентности. Решение задачи осуществлялось в рамках нестационарного неизотермического подхода.

Уравнения движения в тензорной форме записи имеют вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0;$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \right], \quad (1) \end{aligned}$$

где ρ — плотность; u_i — компоненты вектора скорости ($i = 1, 2, 3$); μ — кинематическая вязкость.

Турбулентная вязкость μ_t является функцией кинетической турбулентной энергии k и скорости ее диссипации ε : $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, C_μ — константа.

Уравнения для турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k v_i) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon; \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (3) \end{aligned}$$

Здесь G_k — генерации турбулентной кинетической энергии за счет среднего градиента скорости; G_b — генерация турбулентной кинетической энергии за счет плавучести; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ — константы; σ_k и σ_ε — турбулентные числа Прандтля k и ε соответственно.

Стратификация за счет изменения температуры воды учитывалась следующим образом:

$$G_b = g_i \left(\beta \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right),$$

где μ_t — турбулентная вязкость, которая определяется следующим образом: $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, где C_μ — константа.

Турбулентный перенос тепла моделируется с использованием модели Рейнольдса аналогично турбулентному переносу импульса. Уравнение для энергии имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right), \quad (4) \end{aligned}$$

где $E = ch + \frac{p}{\rho}$ — полная энергия, $h = C_p T$ — энтальпия системы, k_{eff} — эффективная теплопроводность и $(\tau_{ij})_{eff}$ — девиатор тензора напряжений, определенный, как

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}. \quad (5)$$

где $\mu_{eff} = k_{eff} Pr / C_p$ — эффективная вязкость, эффективная теплопроводность определяется как $k_{eff} = k + C_p \mu_t / Pr_t$, k — коэффициент теплопроводности.

Для оценки эффективности применения $k-\varepsilon$ модели турбулентности, были проведены тестовые расчеты с использованием модели более высокого порядка — модели напряжений Рейнольдса, в которой решаются семь дополнительных уравнений для напряжений Рейнольдса. Было установлено, что отличие в полученных данных составляет не более 5%, в связи с чем для дальнейшего исследования использовалась $k-\varepsilon$ модель.

Зависимость плотности от температуры считалась линейной, применялось приближение Буссинеска. В качестве начальных условий задавались однородные распределения температуры и скорости во всем объеме жидкости.

Значения параметров Pr_t , $G_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ε брались следующими [8]: $Pr_t = 0,85$, $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$. Кинематическая вязкость принималась равной $\mu = 9,34 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент молекулярной диффузии $D = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$.

Для дискретизации уравнений по пространству применялась схема второго порядка точности. Описание динамики процессов во времени проводилось по явной схеме второго порядка.

На границах расчетной области задавались следующие граничные условия:

– на дне реки и на ее берегах ставились условия прилипания и постоянства температуры $u_1 = u_2 = u_3 = 0, T = T_0$;

– на входе расчетной области задавалась постоянная скорость основного потока, имеющая одну ненулевую компоненту, температура задавалась равной фоновой температуре реки $u_i = V_i, T = T_0$;

– в местах забора и сброса воды задавались постоянная скорость воды и постоянная температура на входе рабочего канала $u_i = V_1, T = T_0$; на выходе рабочего канала $u_i = V_2, T = T_2$;

– верхняя граница жидкости считалась свободной, на ней учитывалось воздействие ветра — задавались касательные напряжения в соответствии с формулой $\tau = \rho_{air} C W^2$, представленной в работе [21], где ρ_{air} — плотность воз-

духа, C — безразмерный коэффициент напряжений ветра и W — скорость ветра на расстоянии 10 м от водной поверхности. В соответствии с этой формулой для скорости ветра $1 \text{ м/с} < W < 15 \text{ м/с}$ получаем $C = 0,0005 W^{0,5}$. В вычислениях использовалось значение $C = 1,11e-03$ для скорости ветра $W = 5 \text{ м/с}$ и $C = 1,41e-03$ для $W = 8 \text{ м/с}$. Для температуры на поверхности воды задавался линейный закон теплоотдачи, учитывающий нагрев поверхности от окружающего воздуха, коэффициент теплоотдачи выбирался на основании данных полевых измерений.

Для построения расчетной сетки использовалась программа, входящая в пакет ANSYS Fluent. На основании результатов тестовых расчетов для основного моделирования по вертикали число узлов в расчетной области принималось равным 21. При этом по вертикали строилась неравномерная сетка, учитывающая морфометрию дна, в соответствии с результатами натурных измерений в 2014 году. По горизонтали сетка состояла из четырехугольных ячеек, равномерно распределенных по всей длине, с характерным линейным размером 20 м. Размерность сетки составляла порядка четырехсот тысяч узлов. Объемное изображение построенной сетки представлено на рис. 1, а, при этом вертикальный размер для достаточной визуализации увеличен в пятьдесят раз.

Для решения проблемы адаптации существующих морфологических данных в формате «координата—глубина» к возможностям сеткопостроителя была применена процедура «разбиения» морфологии дна на простые геометрические объекты с некоторым заданным разрешением. Была написана программа, позволяющая по массиву данных, описывающих морфологию дна водного объекта, выводить командный файл задания для генератора сеток, входящий в вычислительный пакет ANSYS Fluent. Созданная программа имеет общий характер и применима к построению подобных геометрий и в других задачах.

Предварительно отработывалась методика получения приемлемого численного решения с использованием пакета ANSYS Fluent применительно к данной задаче. Сначала находилось стационарное решение задачи при наличии тяжести, но без учета воздействия ветра. Решение быстро

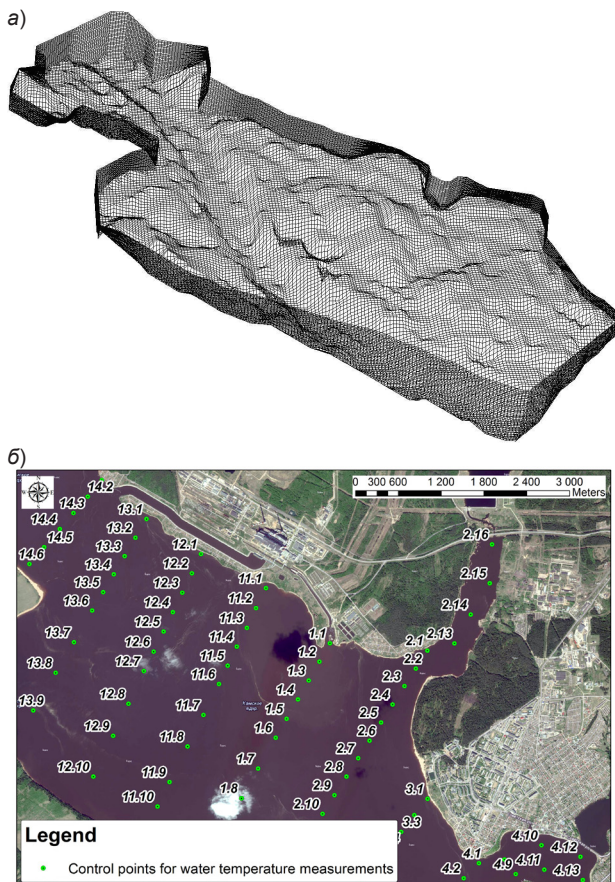


Рис. 3. Схема расчетной области: а — вычислительная сетка. Вертикальный размер увеличен в 50 раз, для достаточной визуализации; б — расположение контрольных точек

сходилось за несколько сотен итераций. Затем решение получалось в рамках нестационарного подхода при наличии ветра, с шагом по времени две секунды.

Результаты численного моделирования

В работе [14] авторов настоящей статьи реализована схема расчетов, направленная на эффективное численное моделирование температурных полей и оценку их характеристик. Проведен сравнительный анализ результатов натурных измерений и численного моделирования. Показано хорошее согласие данных, полученных в результате натурного и численного исследования. Представлены также расчеты для наиболее неблагоприятных сценариев как с точки зрения влияния на окружающую среду, так и с точки зрения влияния на технологический процесс. Данные сценарии рассматривались для постоянного значения ветровой нагрузки, направление ветра при этом также не менялось в течение трех суток. В настоящей работе представлены результаты исследований для ветра переменного направления, когда в течение суток ветер был северным и после этого поменял направление на противоположное, в течение следующих двух расчетных суток учитывалось воздействие южного ветра. Значение модуля скорости ветра на расстоянии 10 м от водной поверхности не менялось, оно составляло 8 м/с. Расход сброса отработанной подогретой воды считался равным 63,0 м³/с, температура сбрасываемой воды 32,4 °С, температура воды водоема-приемника 21,8 °С. Расчеты проводились для процесса сброса отработанной воды в течение трех суток. По результатам моделирования проводилась оценка зоны воздействия подогретых водных масс на водохранилище при смене направления ветра, и определялась вероятность затекания сбрасываемой теплой воды в подводящий канал Пермской ГРЭС.

На рис. 4 показаны поля температуры вблизи поверхности в разные временные интервалы от начала расчетов. На рис. 4, а показано как распространяется подогретая вода от источника сброса через сутки с момента начала сброса, при этом считалось, что в течение этих суток дул северный ветер с постоянной скоростью. Видно, что площадь пятна, в котором температура превышает фоновую на 3 градуса, простирается вниз по течению на несколько километров, вы-

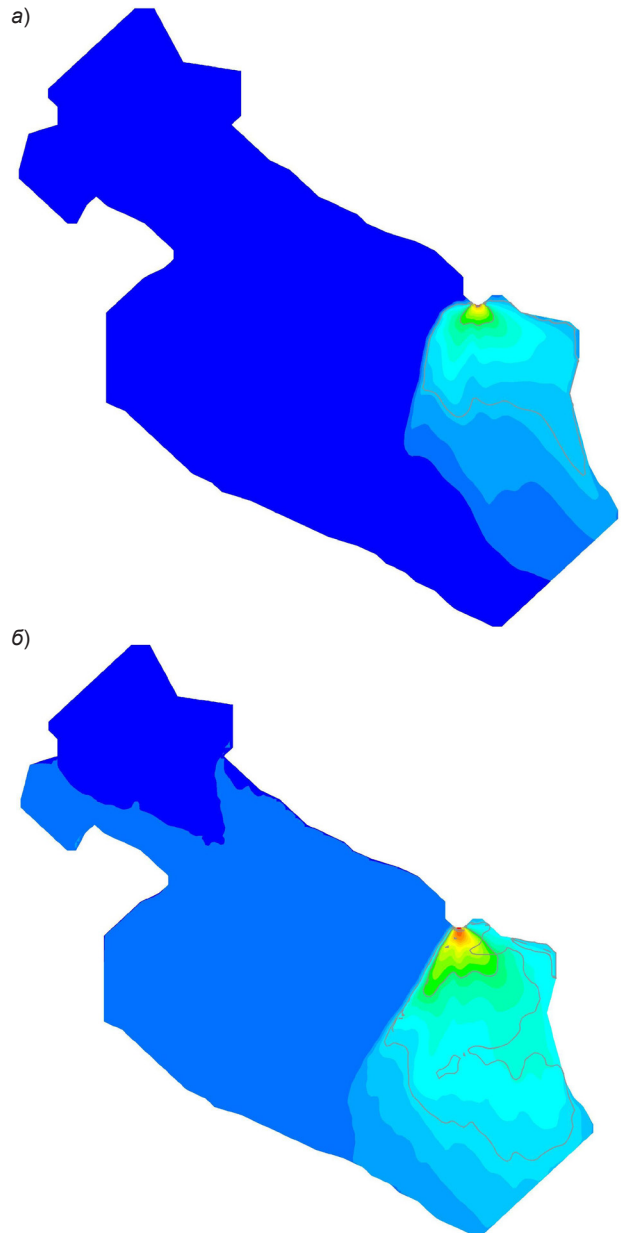


Рис. 4. Поле температуры (°С) в поверхностном слое Камского водохранилища (линиями обозначены границы повышения температуры на 3 и на 5 °С относительно фоновой температуры): а — расчетное время измерений за 1 сутки (воздействие северного ветра); б — расчетное время измерений за 1 сутки и 1 час (1 час после смены направления ветра)

ходя за пределы расчетной области. После смены направления ветра на противоположное теплая вода начинает распространяться против течения реки (рис. 4, б)

На рис. 5 слева представлено поле температуры вблизи водной поверхности, справа приве-

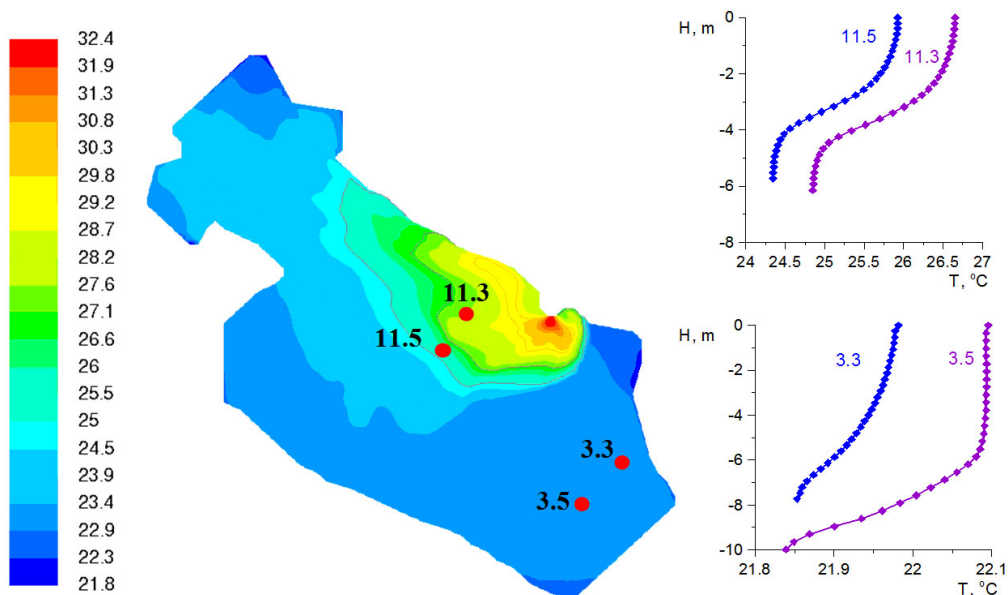


Рис. 5. Поле температуры ($^{\circ}\text{C}$) в поверхностном слое Камского водохранилища (линиями обозначены границы увеличения температуры на 3 и на 5 $^{\circ}\text{C}$ относительно фоновой температуры). Справа показаны распределения температуры по глубине в контрольных точках. Время расчетов 3 суток

дены распределения температуры по глубине на некоторых вертикалях.

Распределение температуры по глубине в разных сечениях в районе водозаборного канала показано на рис. 6. Видно, что глубина воздействия подогретых вод на мелководье составляет 4–6 метров, занимая пространство водоема от поверхности до дна.

Местоположение вертикалей определяется по рис. 3, б. На графиках показана толщина (глубина) слоя воздействия подогретых вод, составляю-

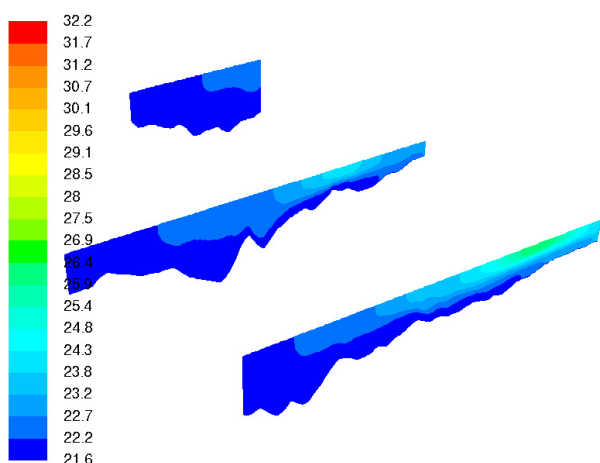


Рис. 6. Поле температуры в различных сечениях в районе водозаборного канала. Для наглядности вертикальный размер увеличен в 5 раз

щая 4–6 метров. В силу разных плотностей теплого сбрасываемого потока и водных масс водохранилища происходит расслоение подогретых вод по поверхности. Глубина воздействия определяется динамическими параметрами сброса, морфометрическими характеристиками участка и удаленностью контрольной вертикали от места сброса.

Анализ векторных полей скорости показывает, что на поверхности структура потока достаточно равномерная и определяется, главным образом, ветровым воздействием. С глубиной (3 м и более) структура меняется коренным образом, появляются вихри и противотечения. Их возникновение объясняется сложностью морфометрии участка, стоковыми течениями и плотностной неоднородностью водных масс. Структура течений на разных глубинах представлена на рис. 7–9. В поверхностном слое структура течений полностью определяется ветровым воздействием и направлена против стоковых течений. Средние скорости $\sim 0,2\text{--}0,3$ м/с (рис. 7). Принципиальные изменения структуры течений происходят на глубине 4–5 м и в нижней части участка наблюдается выраженный трехмерный вихрь, влияние которого распространяется на глубину до 9 м (рис. 8, 9). Кроме того, он оказывает влияние на распределе-

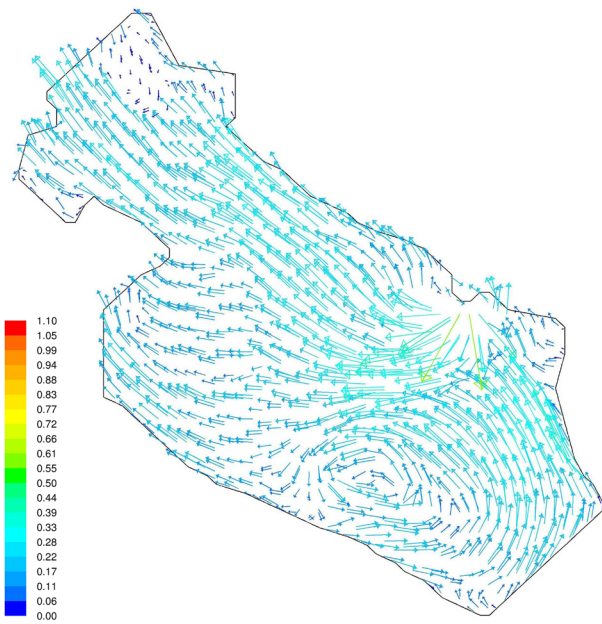


Рис. 7. Векторное поле скорости (м/с) в поверхностном слое Камского водохранилища

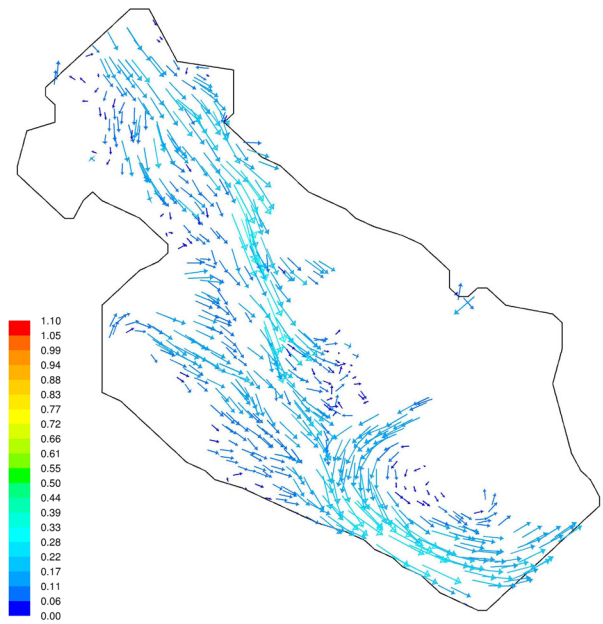


Рис. 9. Векторное поле скорости (м/с) в Камском водохранилище на глубине 10 м

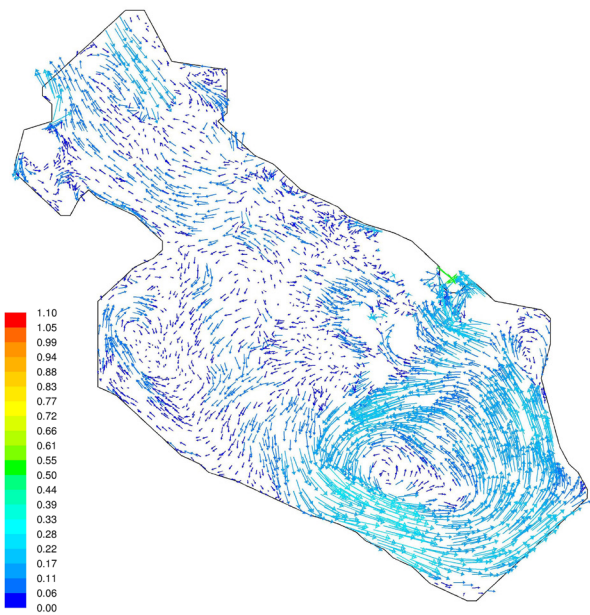


Рис. 8. Векторное поле скорости (м/с) в Камском водохранилище на глубине 5 м

ние температуры, образуя «язык» в нижней части моделируемого участка (см. рис. 5).

Заключение

В работе представлены результаты численного моделирования зон теплового воздействия электростанций, использующих прямоточную систему охлаждения, на крупные водные объ-

екты с учетом влияния переменной ветровой нагрузки. Рассмотрен пример работы Пермской ГРЭС. В результате проведения численных экспериментов в рамках трехмерного подхода получены данные о направлении и скорости течения для разных метеорологических условий. Найдено, что для водоемов-охладителей глубиной более 3–4 м ветровая нагрузка не может обеспечить вертикальное перемешивание и выравнивание температуры воды по глубине. В результате в верхней части водоема-охладителя образуется большой объем теплой воды, температура которой на несколько градусов превышает фоновую. Эта вода при наличии ветра в направлении, противоположном направлению течения реки, попадает в подводящий канал, забирающий воду из водоема для охлаждения в процессе работы электростанции, использующей систему постоянного водотока. Анализ векторных полей скорости показывает, что на поверхности водоток определяется ветровым воздействием. Если ветер направлен против течения реки и длительность его воздействия составляет более суток, то возникают трехмерные вихри, обеспечивающие наличие течения в направлении, противоположном основному течению реки, в слое глубиной более чем 6 метров от поверхности.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-77-20093).

Литература

1. АО «Интер РАО - Электрогенерация» (2011). Пермская ГРЭС [online] Доступно по ссылке: <http://irao-generation.ru/stations/permg/> [Дата обращения: 25.04.2019].

2. Chandel, M. K., Pratson, L. F. and Jackson, R. B. (2011). The potential impacts of climate-change policy on freshwater use in thermoelectric power generation. *Energy Policy*, vol. 39, issue 10, pp. 6234–6242. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.07.022.

3. Dodds, W. and Whiles, M. (2010). *Freshwater ecology concepts and environmental applications of limnology*. 2nd edition. Cambridge: Academic Press, 829 p.

4. Durán-Colmenares, A., Barrios-Piña, H. and Ramírez-León, H. (2016). Numerical modeling of water thermal plumes emitted by thermal power plants. *Water*, vol. 8 (11), 482. DOI: 10.3390/w8110482.

5. Hussey, K. and Pittock, J. (2012). The energy–water nexus: managing the links between energy and water for a sustainable future. *Ecology and Society*, vol. 17 (1): 31. DOI: 10.5751/ES-04641-170131.

6. Issakhov, A. (2013). Mathematical modelling of the influence of thermal power plant on the aquatic environment with different meteorological condition by using parallel technologies. *Power, Control and Optimization*, vol. 239, pp. 165–179. DOI: 10.1007/978-3-319-00206-4_11.

7. Issakhov, A. (2016). Mathematical modeling of the discharged heat water effect on the aquatic environment from thermal power plant under various operational capacities. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 40, issue 2, pp. 1082–1096. DOI: 10.1016/j.apm.2015.06.024.

8. Launder, B. E. and Spalding, D. B. (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*. London, New York: Academic Press, 169 p.

9. Laws, E. A. (2000). *Aquatic pollution: an introductory text*. 3rd edition. New York: John Wiley & Sons, 672 p.

10. Lepikhin, A. P., Lyubimova, T. P., Parshakova, Ya. N. and Tiunov, A. A. (2012). Discharge of excess brine into water bodies at potash industry works. *Journal of Mining Science*, vol. 48 (2), pp. 390–397. DOI: 10.1134/S1062739148020220.

11. Lesieur, M., Metais, O. and Comte, P. (2005). *Large-eddy simulations of turbulence*. New York: Cambridge University Press, 219 p.

12. Lyubimova, T., Lepikhin, A., Konovalov, V., Parshakova, Ya. and Tiunov, A. (2014). Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers. *Journal of Hydrology*, vol. 508, pp. 328–342. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.041.

13. Lyubimova, T., Lepikhin, A., Parshakova, Ya. and Tiunov, A. (2016). The risk of river pollution due to washout from contaminated floodplain water bodies during periods of high magnitude floods. *Journal of Hydrology*, vol. 534, pp. 579–589. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.01.030.

14. Lyubimova, T., Lepikhin, A., Parshakova, Ya., Lyakhin, Yu. and Tiunov, A. (2018). The modeling of the formation of technogenic thermal pollution zones in large reservoirs.

International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 126, part A, pp. 342–352. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.017.

15. Olsen, N. R. B. and Hillebrand, G. (2018). Long-time 3D CFD modeling of sedimentation with dredging in a hydropower reservoir. *Journal of Soils and Sediments*, vol. 18, issue 9, pp. 3031–3040. DOI: 10.1007/s11368-018-1989-0.

16. Perrone, D., Murphy, J. and Hornberger, G. M. (2011). Gaining perspective on the water–energy nexus at the community scale. *Environmental Science & Technology*, vol. 45 (10), pp. 4228–4234. DOI: 10.1021/es103230n.

17. Råman Vinnå, L. R., Wüest, A. and Bouffard, D. (2017). Physical effects of thermal pollution in lakes. *Water Resources Research*, vol. 53, issue 5, pp. 3968–3987. DOI: 10.1002/2016WR019686.

18. Scott, C. A., Pierce, S. A., Pasqualetti, M. J., Jones, A. L., Montz, B. E. and Hoover, J. H. (2011). Policy and institutional dimensions of the water–energy nexus. *Energy Policy*, vol. 39, issue 10, pp. 6622–6630. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.08.013.

19. Sikdar, S. K. and Agrawal, R. (2014). Editorial overview: Energy and environmental engineering: Energy-water nexus: transition from generic to specific. *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 5, pp. v–vi. DOI: 10.1016/j.coche.2014.07.005.

20. Thomas, A. C., Byrne D. and Weatherbee, R. (2002). Coastal sea surface temperature variability from Landsat infrared data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, issues 2–3, pp. 262–272. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00004-4.

21. Wu, J. (1969). Wind stress and surface roughness at sea interface. *Journal of Geophysical Research*, vol. 74, issue 2, pp. 444–455. DOI: 10.1029/JB074i002p00444.

References

1. JSC Inter RAO — Electric Power Plants (2011). Permская Thermal Power Plant. [online] Available at: <http://irao-generation.ru/en/stations/permg/> [Date accessed 25.04.2019].

2. Chandel, M. K., Pratson, L. F. and Jackson, R. B. (2011). The potential impacts of climate-change policy on freshwater use in thermoelectric power generation. *Energy Policy*, vol. 39, issue 10, pp. 6234–6242. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.07.022.

3. Dodds, W. and Whiles, M. (2010). *Freshwater ecology: concepts and environmental applications of limnology*. 2nd edition. Cambridge: Academic Press, 829 p.

4. Durán-Colmenares, A., Barrios-Piña, H. and Ramírez-León, H. (2016). Numerical modeling of water thermal plumes emitted by thermal power plants. *Water*, vol. 8 (11), 482. DOI: 10.3390/w8110482.

5. Hussey, K. and Pittock, J. (2012). The energy–water nexus: managing the links between energy and water for a sustainable future. *Ecology and Society*, vol. 17 (1): 31. DOI: 10.5751/ES-04641-170131.

6. Issakhov, A. (2013). Mathematical modelling of the influence of thermal power plant on the aquatic environment with different meteorological condition by using parallel technologies. *Power, Control and Optimization*, vol. 239, pp. 165–179. DOI: 10.1007/978-3-319-00206-4_11.

7. Issakhov, A. (2016). Mathematical modeling of the discharged heat water effect on the aquatic environment from thermal power plant under various operational capacities. *Applied*

Mathematical Modelling, vol. 40, issue 2, pp. 1082–1096. DOI: 10.1016/j.apm.2015.06.024.

8. Launder, B. E. and Spalding, D. B. (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*. London, New York: Academic Press, 169 p.

9. Laws, E. A. (2000). *Aquatic pollution: an introductory text*. 3rd edition. New York: John Wiley & Sons, 672 p.

10. Lepikhin, A. P., Lyubimova, T. P., Parshakova, Ya. N. and Tiunov, A. A. (2012). Discharge of excess brine into water bodies at potash industry works. *Journal of Mining Science*, vol. 48 (2), pp. 390–397. DOI: 10.1134/S1062739148020220.

11. Lesieur, M., Metais, O. and Comte, P. (2005). *Large-eddy Simulations of Turbulence*. New York: Cambridge University Press, 219 p.

12. Lyubimova, T., Lepikhin, A., Konovalov, V., Parshakova, Ya. and Tiunov, A. (2014). Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers. *Journal of Hydrology*, vol. 508, pp. 328–342. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.041.

13. Lyubimova, T., Lepikhin, A., Parshakova, Ya. and Tiunov, A. (2016). The risk of river pollution due to washout from contaminated floodplain water bodies during periods of high magnitude floods. *Journal of Hydrology*, vol. 534, pp. 579–589. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.01.030.

14. Lyubimova, T., Lepikhin, A., Parshakova, Ya., Lyakhin, Yu. and Tiunov, A. (2018). The modeling of the formation of technogenic thermal pollution zones in large reservoirs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 126, part A, pp. 342–352. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.017.

15. Olsen, N. R. B. and Hillebrand, G. (2018). Long-time 3D CFD modeling of sedimentation with dredging in a hydropower reservoir. *Journal of Soils and Sediments*, vol. 18, issue 9, pp. 3031–3040. DOI: 10.1007/s11368-018-1989-0.

16. Perrone, D., Murphy, J. and Hornberger, G. M. (2011). Gaining perspective on the water–energy nexus at the community scale. *Environmental Science & Technology*, vol. 45 (10), pp. 4228–4234. DOI: 10.1021/es103230n.

17. Râman Vinnă, L., Wüest, A. and Bouffard, D. (2017). Physical effects of thermal pollution in lakes. *Water Resources Research*, vol. 53, issue 5, pp. 3968–3987. DOI: 10.1002/2016WR019686.

18. Scott, C. A., Pierce, S. A., Pasqualetti, M. J., Jones, A. L., Montz, B. E. and Hoover, J. H. (2011). Policy and institutional dimensions of the water–energy nexus. *Energy Policy*, vol. 39, issue 10, pp. 6622–6630. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.08.013.

19. Sikdar, S. K. and Agrawal, R. (2014). Editorial overview: Energy and environmental engineering: Energy-water nexus: transition from generic to specific. *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 5, pp. v–vi. DOI: 10.1016/j.coche.2014.07.005.

20. Thomas, A. C., Byrne D. and Weatherbee, R. (2002). Coastal sea surface temperature variability from Landsat infrared data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, issues 2–3, pp. 262–272. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00004-4.

21. Wu, J. (1969). Wind stress and surface roughness at sea interface. *Journal of Geophysical Research*, vol. 74, issue 2, pp. 444–455. DOI: 10.1029/JB074i002p00444.

Авторы

Любимова Татьяна Петровна, д-р физ.-мат. наук, профессор

Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия

E-mail: lyubimovat@mail.ru

Паршакова Янина Николаевна, канд. физ.-мат. наук
Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия

E-mail: parshakova@icmm.ru

Authors

Lyubimova Tatyana Petrovna, Dr. of Physics and Mathematics

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

E-mail: lyubimovat@mail.ru

Parshakova Yanina Nikolaevna
Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

E-mail: parshakova@icmm.ru