

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОДОЕМОВ-ОХЛАДИТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СХЕМ СЕЛЕКТИВНОГО ЗАБОРА ВОДЫ

Любимова Т. П., Паршакова Я. Н., Лепихин А. П., Ляхин Ю. С.

INCREASING THE STABILITY OF COOLING RESERVOIRS' OPERATION BY USING SELECTIVE WATER INTAKE SCHEMES

Lyubimova T. P., Parshakova Ya. N., Lepikhin A. P., Lyakhin Yu. S.

Аннотация

Введение. Рассматриваются вопросы повышения устойчивости функционирования водоемов-охладителей крупных энергетических комплексов в периоды наблюдения экстремально высоких температур воздуха. Эти периоды весьма непродолжительны, не более 10 суток. Распределение температуры воды в водоемах-охладителях, как правило, существенно неоднородно по глубине: под поверхностным наиболее прогретым слоем располагается более холодный придонный слой. В связи с этим для экстремальных периодов предлагается организация селективного забора из придонных холодных слоев. Гидродинамические аспекты организации такой схемы водообеспечения рассматриваются на конкретном примере резервуара-охладителя ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО ММК). **Методы.** Учитывая принципиальную важность учета и анализа вертикальной структуры рассматриваемых температурных полей, задача решалась в трехмерной постановке в негидростатическом приближении. Вычислительные эксперименты проводились с использованием пакета ANSYS Fluent. **Результаты.** Исследовано формирование тепловых полей в водоеме-охладителе как при штатной работе системы охлаждения, так и в аварийном режиме, при экстремально высокой температуре воздуха. В качестве одной из мер бесперебойной устойчивой работы системы охлаждения при экстремальных метеоусловиях предложена организация селективного забора воды из придонного горизонта резервуара-охладителя путем заглубления щитов-отсекателей. **Заключение.** Предложенная схема селективного забора воды из нижних горизонтов резервуара охладителя позволяет обеспечивать устойчивость функционирования рассматриваемой системы охлаждения в период наблюдения экстремально высоких температур воздуха до десяти суток.

Ключевые слова: водоемы-охладители, энергетические комплексы, устойчивость функционирования, селективный забор воды.

Abstract

Introduction. The paper addresses issues of increasing the stability of cooling reservoirs' operation at large power plants during periods when extremely high air temperatures occur. These periods are usually very short and last no more than 10 days. As a rule, the water temperature distribution by depth in cooling reservoirs is substantially inhomogeneous: under the surface layer, which is the warmest, there is a near-bottom layer, which is significantly colder. In this regard, during the periods characterized by extreme temperatures, it is proposed to perform selective water intake from the cold near-bottom layers. The authors analyze the hydrodynamic aspects of such a water supply scheme through the example of a cooling reservoir at the Magnitogorsk Iron and Steel Works (MMK PJSC). **Methods.** Given that it is crucial to consider and analyze the vertical structure of the studied temperature fields, the problem was solved in a three-dimensional setting in a non-hydrostatic approximation. Computational experiments were performed using the ANSYS Fluent package. **Results.** The authors studied the formation of thermal fields in the cooling reservoir both during the normal operation of the cooling system and in the emergency mode, i.e. at extremely high air temperatures. As one of the measures to ensure the uninterrupted, stable operation of the cooling system under extreme weather conditions, it was proposed to perform selective water intake from the bottom level of the cooling reservoir by deepening the cut-off panels. **Conclusions.** The proposed scheme of selective water intake from the lower levels of the cooling reservoir makes it possible to ensure the stability of cooling system operation during periods when extremely high air temperatures occur, which last up to 10 days.

Keywords: cooling reservoirs, power plants, operation stability, selective water intake.

Введение

В настоящее время социально-экономическое развитие территорий практически невозможно без увеличения потребления электроэнергии. Для увеличения выработки электроэнергии про-

водится реконструкция существующих и создание новых тепловых и атомных электростанций. Поскольку полное преобразование химической или атомной энергии в электрическую практически невозможно, то необходимыми и обяза-

тельными компонентами тепловых и атомных энергетических комплексов являются системы охлаждения их рабочих органов. В силу их очень высокой теплоемкости в качестве рабочей среды для передачи тепловой энергии используется вода. При этом возникает ключевая проблема охлаждения этой рабочей среды — передачи тепла от нее в окружающую среду.

При решении практических задач для охлаждения, наряду с различными типами градирен, в настоящее время широко используются как проточные водные объекты, так и оборотные системы охлаждения на основе специальных водоемов-охладителей.

На электростанциях, использующих системы постоянного водотока, 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, 15]. Огромное количество тепла, переносимого термальной водой, сбрасывается в приемный резервуар, в результате естественная температура воды в нем увеличивается, что оказывает прямое или косвенное воздействие на окружающую среду [3]. По этой причине взаимосвязь между энергетическими и водными ресурсами является актуальной проблемой, рассматриваемой многими учеными научных и государственных учреждений [2, 5, 17, 19, 20].

Для изучения термического загрязнения используются различные методы. Зоны теплового загрязнения, формируемые крупными энергетическими комплексами, обычно контролируются путем измерения температуры воды в контрольных точках. Результаты этих измерений достаточно точные, однако этот метод требует больших ресурсов, поскольку размер выборки ограничен и доступны только дискретные данные, которые не могут отражать пространственное изменение теплового шлейфа [21]. При этом при решении широкого круга практических задач важна оценка возможных зон теплового загрязнения в различных экстремальных технологических и гидрометеорологических ситуациях. Один из самых эффективных методов исследования — численное моделирование, необходимое для понимания эффектов, которые оказывают тепловые электростанции на окружающую среду [4, 14].

Вычислительные аспекты моделей турбулентности при описании тепловых потоков обсуждаются в работах [6, 18]. Трехмерное численное моделирование турбулентного смешения водных масс с разными температурами проводилось в [7, 11, 16] на основе решения уравнений Навье-Стокса и разных моделей турбулентности. Расчеты выполнялись с использованием параллельных вычислений.

Авторами настоящей работы разработаны гидродинамические модели поверхностных водных объектов, основанные на трехмерном численном моделировании с учетом плотностных эффектов [10, 12, 13, 14]. Разработанные технологии моделирования теплового загрязнения водных объектов использовались для описания не только проточных систем охлаждения, но и оборотных систем [15]. Оборотные системы охлаждения с использованием водоемов-охладителей — наиболее распространенный инструмент охлаждения отводимых стоков на крупных тепловых и атомных энергетических станциях. Однако при этом возникает принципиально важная задача — обеспечение нормативного качества забираемой воды в условиях стохастической изменчивости как метеорологических, так и гидрологических параметров. Наиболее сложным является решение этой задачи в случае, когда используется оборотная система водопользования, оказывающая значительно меньшее воздействие на окружающую среду по сравнению с проточными системами. Критические периоды, связанные с наблюдением максимально высоких температур воздуха, как правило, весьма непродолжительны, поэтому существенный интерес представляет решение задачи повышения устойчивости функционирования водоемов-охладителей за счет максимально полного использования «внутренних» резервов водоема-охладителя.

Характерной особенностью температурных режимов водоемов-охладителей является значительная вертикальная неоднородность распределения температуры воды по глубине. В летний лимитирующий период температура воды в поверхностном слое толщиной 3–4 м, как правило, на 5–10 °C выше, чем в нижележащем слое. При этом имеется ярко выраженная граница между этими слоями. Для повышения устойчивости функционирования энергетического комплекса

в наиболее критические периоды с максимальной высокой температурой воздуха продолжительностью ~ 5–10 суток предлагается организация забора воды для охлаждения из нижнего горизонта с более холодной водой. Такая постановка существенно усложняет задачу. Поэтому для ее решения были выполнены вычислительные эксперименты в трехмерной постановке в негидростатическом приближении на конкретном примере резервуара-охладителя энергетического комплекса, обеспечивающего тепловой и электрической энергией одно из крупнейших предприятий черной металлургии ПАО ММК в г. Магнитогорске. Данное предприятие располагается на Южном Урале (Россия). В этом регионе наблюдаются высокие температуры воздуха в июле-августе. В основу построения расчетов положен сценарный принцип. Сами сценарии строились исходя из анализа поставленных задач, возможных диапазонов изменения регулируемых параметров. В 2018 году на Магнитогорском металлургическом комбинате закончилась реализация проекта по расширению резервуара-охладителя с переходом на работу по замкнутому циклу. При этом ввиду сложности общей системы водопользования существующих структурных подразделений возникла необходимость «отладки» функционирования водоема-охладителя в различных условиях, в частности в аварийных ситуациях, которые могут возникнуть в наиболее теплый (лимитирующий) период эксплуатации. Выбранные для расчетов сценарии соответствуют штатной и нештатной (аварийной) ситуациям.

Методы и материалы

Трехмерная гидродинамическая модель разрабатывалась для части резервуара с линейными размерами 2000 м, прилегающей к ММК и включающей в себя точки водозабора и сброса воды в охлаждающий резервуар (рис. 1). Для проведения трехмерного численного моделирования использовался программный пакет ANSYS Fluent на вычислительном кластере URAN Института математики и механики им. Н. Н. Красовского (ИММ УрО РАН, Россия). Задача решалась в рамках нестационарного неизотермического подхода на основе $k-\epsilon$ модели турбулентности.

Уравнения для осредненной по Рейнольдсу скорости \bar{u} в тензорной форме записывались в виде

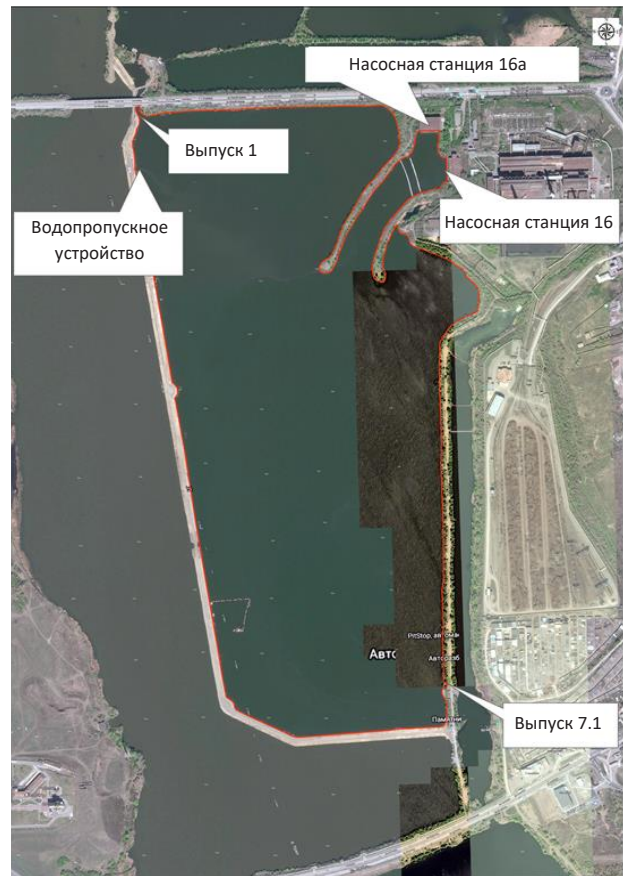


Рис. 1. Исследуемый резервуар-охладитель ММК, отмеченный на космоснимке с указанием мест забора и выпуска воды

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) =$$

$$= -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \right], \quad (1)$$

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 :

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon, \quad C_\mu \text{ — константа.}$$

Уравнения для турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации представлялись следующим образом:

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

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.

Стратификационные плотностные эффекты в поле силы тяжести за счет изменения температуры воды учитывались в слагаемом G_b , имеющем вид

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

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

Турбулентный перенос тепла моделировался с использованием модели Рейнольдса аналогично турбулентному переносу импульса. Уравнение для энергии имело 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 $\kappa_{eff} = \kappa + C_p \mu_t / Pr_t$, κ — коэффициент теплопроводности.

Применимость $k - \varepsilon$ модели турбулентности исследовалась в работах [3, 17]. 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 описывалась в рамках приближения Буссинеска. В качестве начальных условий задавались однородные распределения температуры и скорости во всем объеме жидкости.

Значения параметров задачи Pr_t , Sc_t , $G_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ε брались следующими [6]: $Pr_t = 0,85$, $Sc_t = 0,7$, $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$. Кинематическая вязкость принималась равной $\mu = 9,34 \cdot 10^{-7}$ м²/с, коэффициент молекулярной диффузии $D = 1,0 \cdot 10^{-9}$ м²/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 водоема и его берегах ставились условия прилипания и постоянства температуры $u_1 = u_2 = u_3 = 0$, $T = T_0$;

- в местах забора и сброса воды задавались постоянные скорость воды и 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 [7], где ρ_{air} — плотность воздуха, C — безразмерный коэффициент напряжений ветра и W — скорость ветра на расстоянии 10 м от водной поверхности. В соответствии с [7] для скоростей ветра из диапазона 1 м/с < W < 15 м/с безразмерный параметр имеет вид $C = 0,0005 W^{0,5}$. Вычисления проводились для скорости ветра $W = 3,8$ м/с, поэтому использовалось значение $C = 9,5e - 04$. Метеорологические условия для расчетов выбирались на основе статистической обработки результатов наблюдений на метеостанции г. Магнитогорска во вторую декаду июля 2019 года (наиболее жаркую декаду за весь период метеорологических наблюдений по г. Магнитогорску, определяющую наиболее сложный лимитирующий период оборотного водообеспече-

ния). В частности, средняя скорость ветра в этот период составляла 3,8 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 [14] и составлял 100 Вт/м²К.

Вычислительная сетка строилась с учетом морфологии дна исследуемого участка (см. рис. 1). По вертикали число узлов сетки составляло 21, узлы были расположены неравномерно с учетом неровности дна водоема. По горизонтали сетка состояла из четырехугольных ячеек, равномерно распределенных по всей длине, с характерным линейным размером 20 м. Общая размерность сетки составляла порядка пятисот тысяч узлов. Объемное изображение построенной сетки представлено на рис. 2, при этом вертикальный размер для достаточной визуализации увеличен в десять раз.

Сценарии для расчетов

Согласно данным многолетних наблюдений, температура воды в нижних горизонтах Магни-

тогорского водохранилища с глубинами свыше 4 м, как правило, не превышает 15 °С. Представляется возможным повышение устойчивости работы резервуара-охладителя в летний период с наиболее высокими температурами воздуха путем организации селективного забора охлажденной воды из нижних придонных горизонтов водохранилища. В связи с этим исследовались два режима работы системы охлаждения: штатный и аварийный, возникающие при наблюдении экстремально высоких температур воздуха. Основные технологические характеристики этих режимов представлены ниже.

Штатный режим

- Водопропускное устройство — труба диаметром 1,4 м, заглубленная на 1 м под воду; расход сброса воды 0,7 м³/с.
- Выпуск 1 — канал с прямоугольным поперечным сечением шириной 11 м глубиной 1,5 м; расход сброса воды 11,5 м³/с; температура воды 29 °С.
- Выпуск 7.1 — канал с прямоугольным поперечным сечением шириной 5 м, глубиной

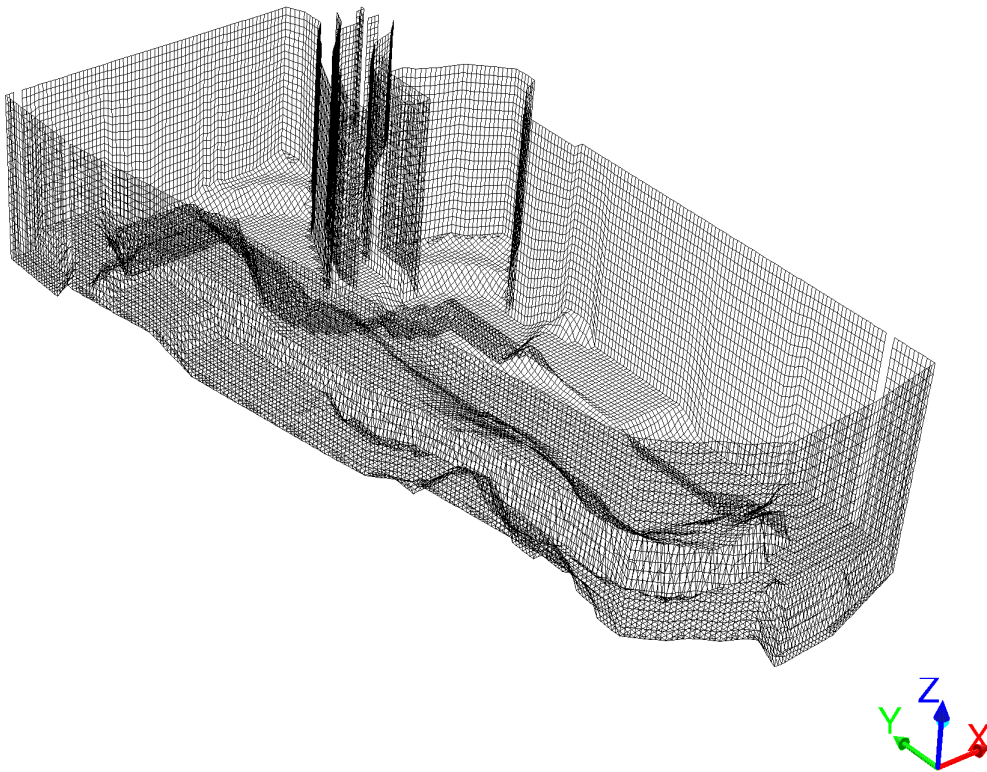


Рис. 2. Сетка вычислительной области. Вертикальный размер по сравнению с горизонтальным увеличен в 10 раз для лучшей визуализации

1,5 м; расход сброса воды 3,0 м³/с; температура воды 36 °С.

- Насосная станция 16а в вертикальном сечении представляет собой прямоугольник шириной 55 м, глубиной 0,5 м, верхний слой отделен тонкой стенкой глубиной 2 м; расход забора воды 7,7 м³/с.

- Насосная станция 16 в вертикальном сечении представляет собой прямоугольник шириной 65 м, глубиной 0,5 м, верхний слой отделен тонкой стенкой глубиной 2 м; расход забора воды 7,5 м³/с.

Режим аварийного сброса

- Водопропускное устройство — 2 трубы, диаметром 1,4 м; суммарный расход сброса воды 4,0 м³/с; температура воды 15 °С.

- Выпуск 1 — канал с прямоугольным поперечным сечением шириной 11 м, глубиной 1,5 м; расход сброса воды 15,5 м³/с; температура воды 29 °С.

- Выпуск 7.1 — канал с прямоугольным поперечным сечением шириной 5 м, глубиной 1,5 м; расход сброса воды 3,0 м³/с; температура воды 36 °С.

- Насосная станция 16а в вертикальном сечении представляет собой прямоугольник шириной 55 м, глубиной 0,5 м, верхний слой отделен тонкой стенкой глубиной 2 м; расход забора воды 15,0 м³/с.

- Насосная станция 16 в вертикальном сечении представляет собой прямоугольник шириной 65 м, глубиной 0,5 м, верхний слой отделен тонкой стенкой глубиной 2 м; расход забора воды 7,5 м³/с.

Принципиальное различие двух рассматриваемых режимов состоит в параметрах работы водопропускного устройства. Поскольку технологические параметры систем водопотребления и водоотведения непосредственно производственного комплекса должны быть стабильны, исследовалась возможность влияния на температурный режим резервуара-охладителя увеличения подачи охлажденной воды путем ее селективного отбора из придонных горизонтов Магнитогорского водохранилища.

Метеорологические условия. Среднемесячными характеристиками оперировать некорректно в связи с тем, что сама система чувствительна к декадным характеристикам, да и период осред-

нения в месяц — это очень много, условия меняются коренным образом. Поэтому были исследованы варианты с метеорологическими условиями на 2-ю декаду июля 2019 года: средняя температура — 22,5 °С, средняя относительная влажность — 51 %, ветер с северо-запада со средней скоростью 3,8 м/с.

Характерной особенностью теплового режима рассматриваемого резервуара охладителя, как и других достаточно глубоких водоемов, является существенная вертикальная неоднородность поля температуры. Поверхностные слои занимают более прогретые менее плотные воды, а нижние слои — более охлажденные воды, температурная разница может достигать 5 °С и более. При этом граница между этими слоями, как правило, бывает ярко выражена и обозначается как слой температурного скачка. Проведенные исследования [15] показали наличие и устойчивость температурных скачков в исследуемом водоеме-охладителе.

Для решения задачи повышения устойчивости технологического водообеспечения в период наиболее высоких температур воздуха, как уже отмечалось, весьма перспективной представляется организация хотя бы кратковременного забора воды из нижних более холодных горизонтов. При этом возникает проблема оценки изменения вертикальной структуры температурных полей в условиях забора воды на технологические цели из нижних более холодных горизонтов.

Результаты исследования и обсуждение

Штатный режим работы

Полученные для условий штатного режима результаты наглядно показывают наличие существенной стратификации при формировании температурных полей (рис. 3–5). Наибольшее температурное воздействие на акваторию оказывают сбросы выпуска № 7, в то время как стоки выпуска № 1 охлаждаются за счет поступления более холодной воды из придонного горизонта Магнитогорского водохранилища через водопропускное устройство, обеспечивающее забор воды из нижних более холодных горизонтов. С течением времени фоновая температура повышается, прогреваются более глубокие слои водной толщ. Так, за первые сутки от начала сброса прогретым оказывается слой воды толщиной 2 м (рис. 3). При этом забор воды на насосных стан-

циях производится с отсечением от водной поверхности с помощью щита размером 2 м вглубь водоема. Как видно на рисунках, такая технология забора воды из придонных слоев достаточно эффективна: на глубине 3 м в охлаждающие каналы поступает холодная вода с температурой около 16 °С. Из-за ограничивающего действия щита вблизи насосных станций скорость воды в придонных слоях выше, чем на поверхности, что приводит к сильному перемешиванию водных масс, не позволяя теплой воде попадать в систему охлаждения.

С течением времени теплая вода занимает все большую часть акватории по глубине. Так, по истечении вторых суток от начала сброса температура воды 26 °С наблюдается на глубине 3 м от поверхности (рис. 4). Часть теплой воды начинает поступать на насосные станции, попадая в систему охлаждения.

При дальнейшей работе насосных станций в прежнем режиме и при сохранении средней суточной температуры воздуха 22,5 °С средняя температура водоема-приемника увеличивается. Так, после трех суток работы в данном режиме на глубине 3 м формируются области, в которых

температура достигает 28 °С (рис. 5). Распределения температуры по глубине вблизи насосных станций представлены на рис. 6. Таким образом, при штатном режиме работы действующей системы охлаждения невозможно обеспечить устойчивость ее функционирования уже на 3 сутки наблюдения экстремально высоких температур воздуха.

Скоростной режим водоема достигает стационарного состояния в течение первых суток от начала сброса, при этом в качестве начальных условий задаются нулевое поле скорости и постоянная температура воды по всей акватории. Векторные поля скорости на различных глубинах представлены на рис. 7 для времени 3 суток сброса отработанной воды. Поле скорости имеет вихревую структуру. Вихри локализованы в верхней части резервуара и в центральной. Изменение формы вихрей по глубине незначительно, меняется лишь интенсивность течения.

Режим работы в аварийной ситуации

В аварийном режиме работы из внешней части акватории водохранилища поступает большее количество холодной воды с температурой 15 °С: расход 4 м³/с, в то время как при штатном режиме

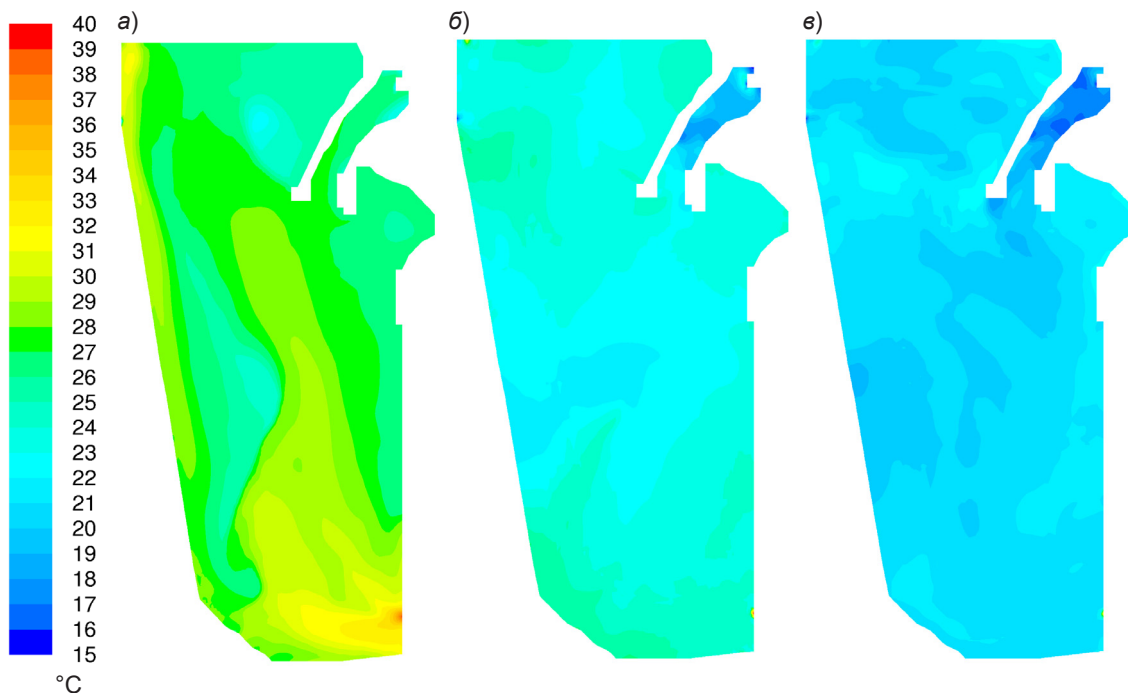


Рис. 3. Поле температуры воды на поверхности (а), на глубине 2 м от поверхности (б) и на глубине 3 м от поверхности (е) в замкнутой системе резервуара-охладителя для штатного режима сброса отработанной воды. Расчетное время — 1 сутки с начала отведения теплой воды

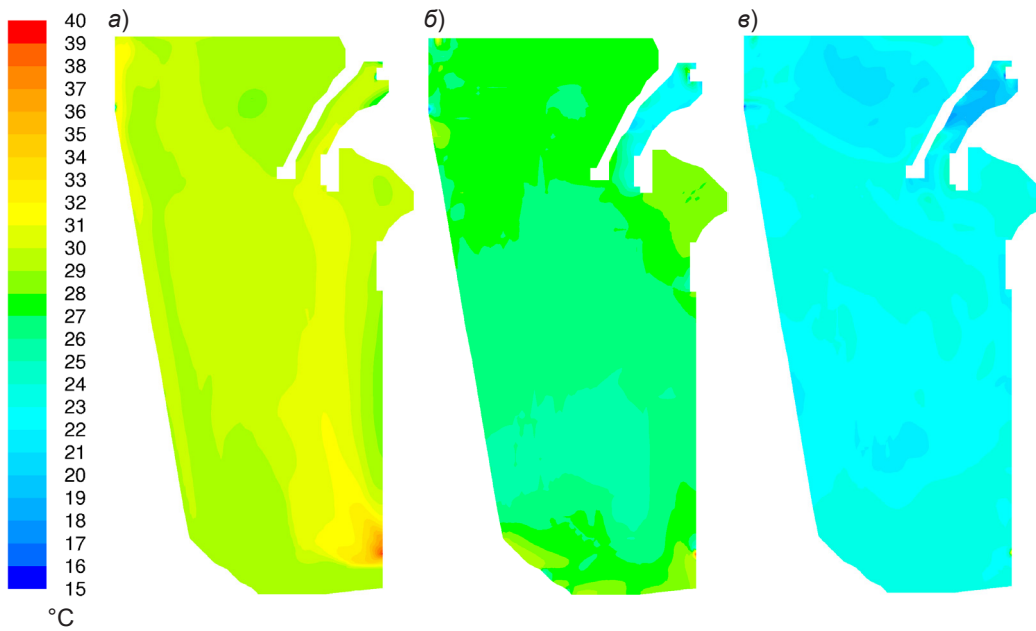


Рис. 4. Поле температуры воды на поверхности (а), на глубине 2 м от поверхности (б) и на глубине 3 м от поверхности (в) в замкнутой системе резервуара-охладителя для штатного режима сброса отработанной воды. Расчетное время — 2 суток с начала отведения теплой воды

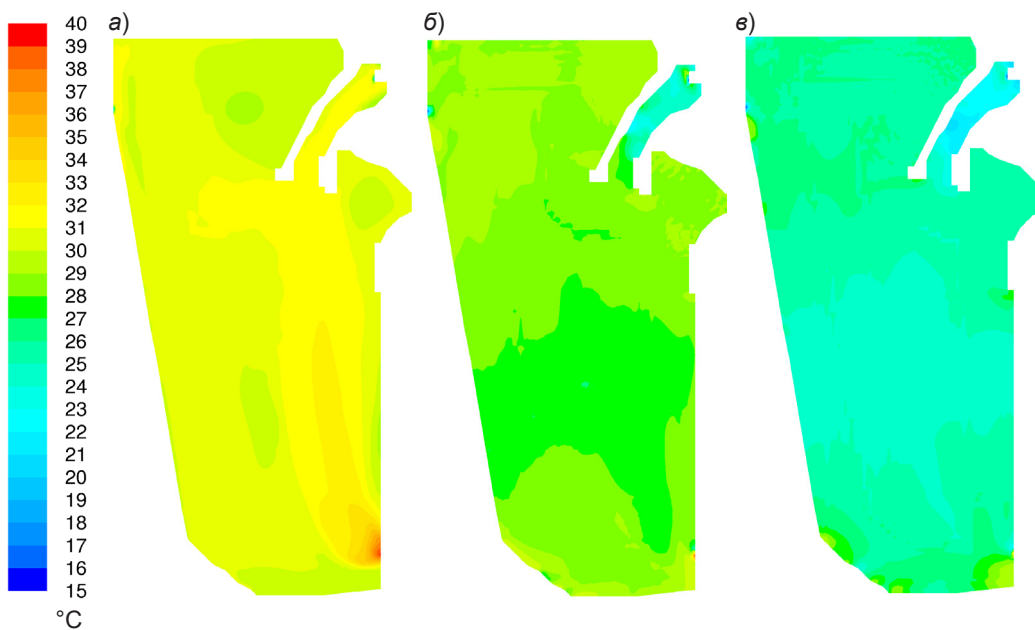


Рис. 5. Поле температуры воды на поверхности (а), на глубине 2 м от поверхности (б) и на глубине 3 м от поверхности (в) в замкнутой системе резервуара-охладителя для штатного режима сброса отработанной воды. Расчетное время — 3 суток с начала отведения теплой воды

работы с такой же температурой забора воды вне резервуара расход составляет $0,7 \text{ м}^3/\text{с}$. За первые сутки работы в аварийном режиме разбавление теплой воды за счет водопропускного устройства является эффективным, теплая вода практически

не попадает в насосные сооружения (рис. 8). Перемешивание водных масс интенсивное.

С течением времени эффективность охлаждения за счет водозаборного канала понижается, через двое суток после начала сброса вода с тем-

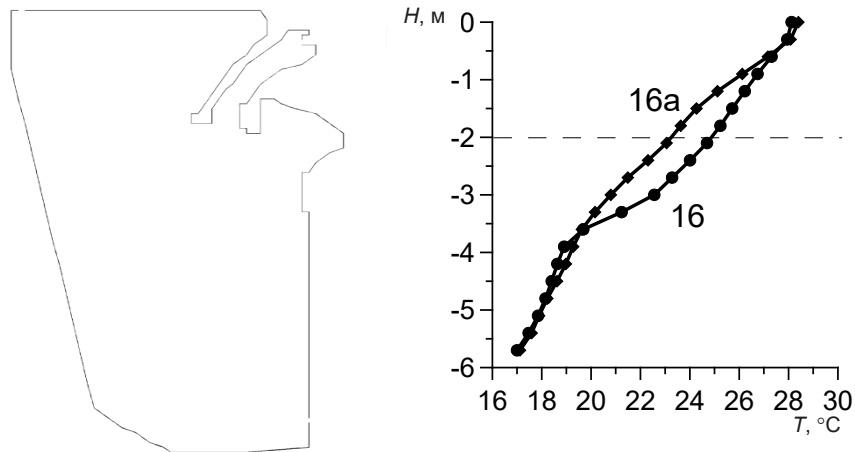


Рис. 6. Распределения температуры по глубине вблизи насосных станций в точках 16 и 16а для штатного режима работы

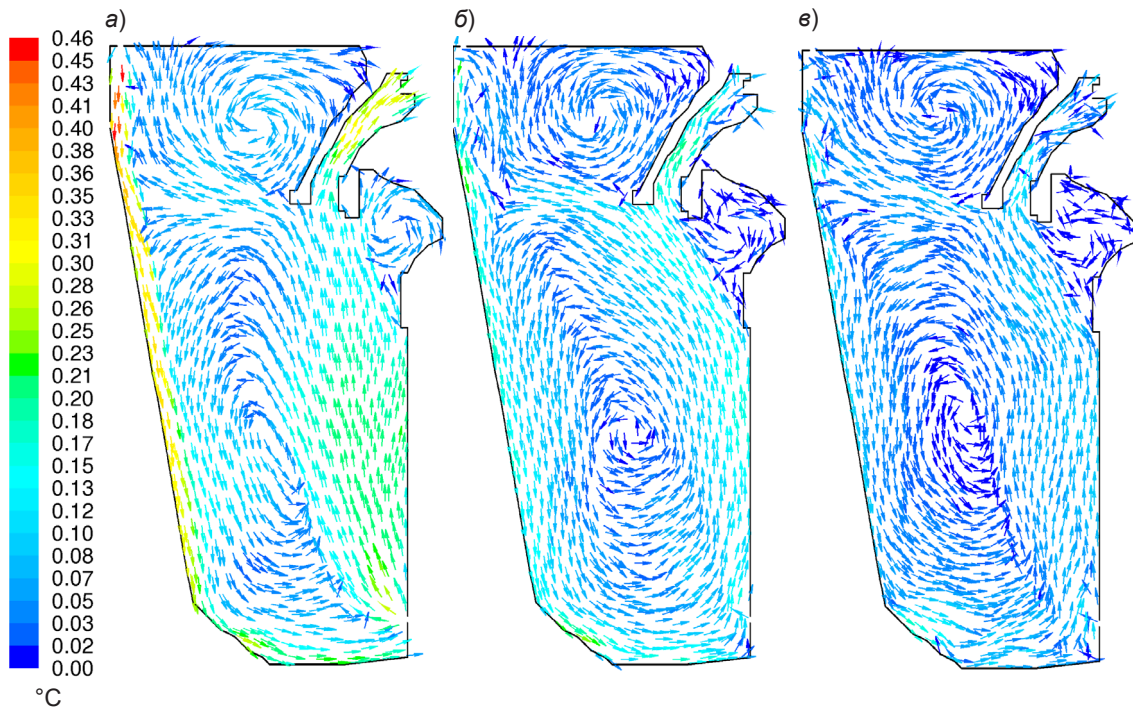


Рис. 7. Векторные поля скорости воды на поверхности (а), на глубине 2 м от поверхности (б) и на глубине 3 м от поверхности (е) в замкнутой системе резервуара-охладителя для штатного режима сброса отработанной воды. Расчетное время — 3 суток с начала отведения тепловой воды

пературой 26 °С забирается насосными станциями и попадает в систему охлаждения (рис. 9).

При аварийном режиме работы, спустя трое суток работы в режиме аварийного сброса, формируются отдельные области с температурой 29 °С даже на глубине 3 м (рис. 10). Однако в районе водозаборов насосных станций существенная вертикальная стратификация температу-

ры воды сохраняется. Распределение температуры по глубине вблизи насосных станций представлено на рис. 11. Насосная станция 16а работает в режиме большего потребления воды, ее расход в два раза превышает расход на насосной станции 16, поэтому температура забора воды на станции 16а выше, чем на станции 16. Максимальная температура воды, поступающей для

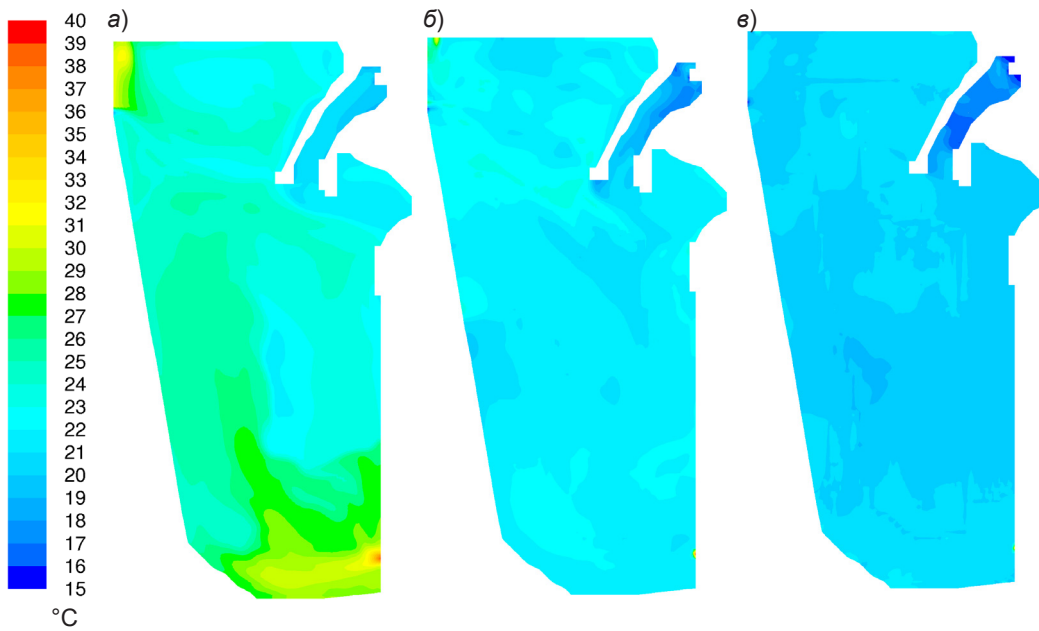


Рис. 8. Поле температуры воды на поверхности (а), на глубине 2 м от поверхности (б) и на глубине 3 м от поверхности (в) в замкнутой системе резервуара-охладителя для режима аварийного сброса отработанной воды. Расчетное время — 1 сутки с начала отведения теплой воды

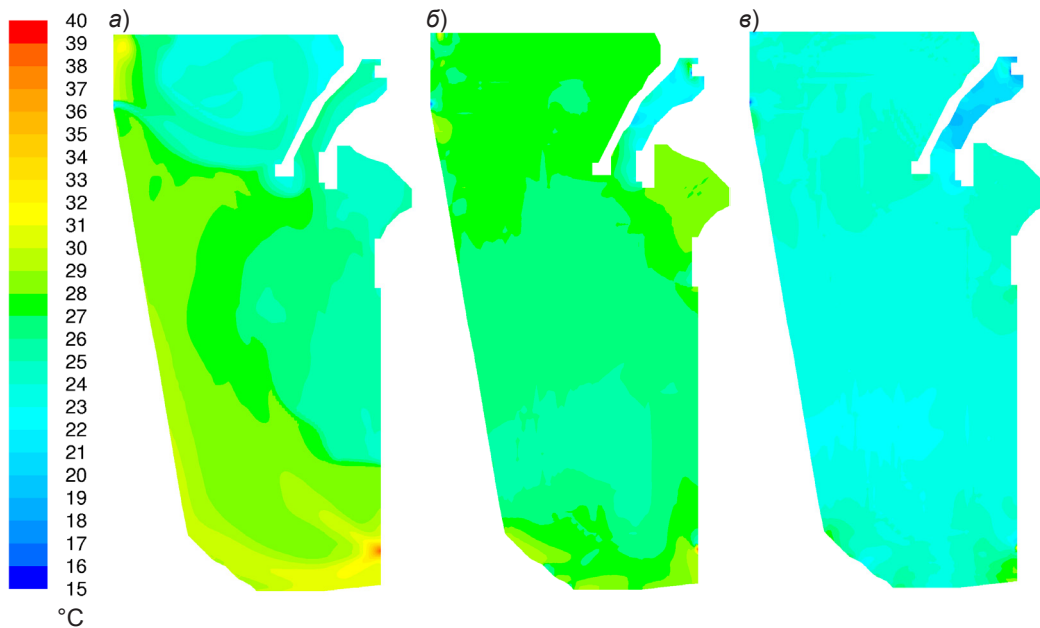


Рис. 9. Поле температуры воды на поверхности (а), на глубине 2 м от поверхности (б) и на глубине 3 м от поверхности (в) в замкнутой системе резервуара-охладителя для режима аварийного сброса отработанной воды. Расчетное время — 2 суток с начала отведения теплой воды

охлаждения, составляет 22 °С, что значительно меньше, чем при работе в штатном режиме, где температура забираемой воды более 26 °С.

Векторные поля скорости на разных глубинах через трое суток работы в режиме аварийного сброса представлены на рис. 12. Как вид-

но, вихревая структура поля скорости меняется с глубиной. Интенсивность течения с глубиной меняется слабо, что приводит к значительному перемешиванию водных масс, прогревающему более глубокие слои.

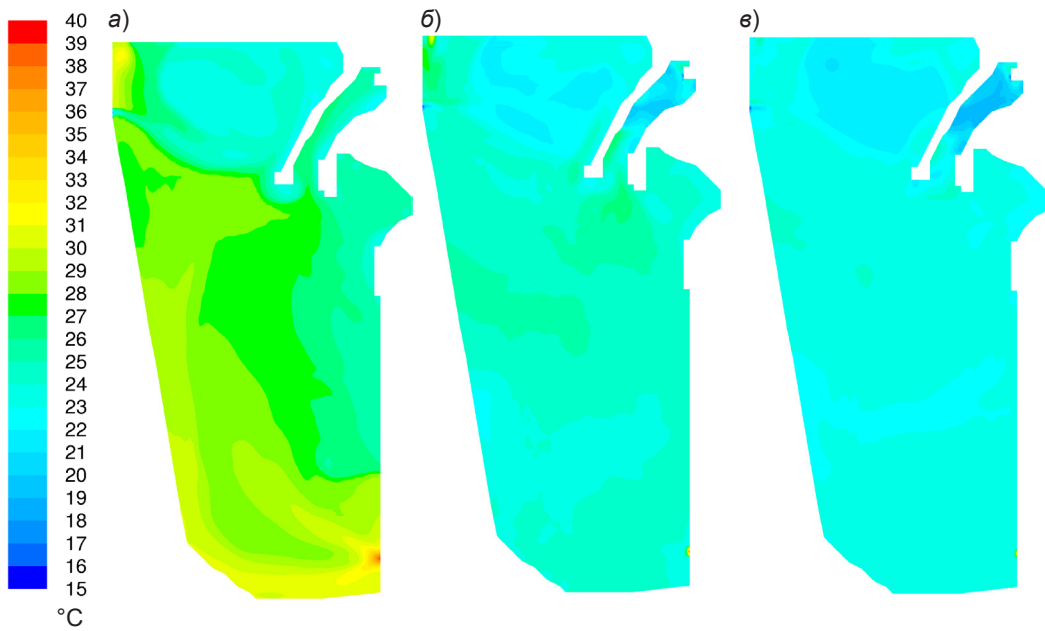


Рис. 10. Поле температуры воды на поверхности (а), на глубине 2 м от поверхности (б) и на глубине 3 м от поверхности (в) в замкнутой системе резервуара-охладителя для режима аварийного сброса отработанной воды. Расчетное время — 3 суток с начала отведения тепловой воды

Таким образом, при наличии щитов-отсекателей, заглубленных на 2 м, эффективным является осуществление большего забора холодной воды из внешнего участка водохранилища по отношению к резервуару-охладителю, режим работы при аварийном сбросе. В случае, когда поступление холодной воды недостаточно для эффективного разбавления теплой отработанной воды, как показал сценарный режим работы в экстремальных метеоусловиях, одной из мер бесперебойной работы системы охлаждения является заглубле-

ние щитов-отсекателей, т. е. забор воды из более придонных слоев резервуара.

Заключение

В работе на основе трехмерных численных расчетов получена оценка возможного времени устойчивого функционирования резервуара-охладителя при экстремально высокой температуре воздуха в случае штатного режима работы насосных станций и режима аварийного сброса. Полученные данные о температурных и векторных полях скорости на разных глубинах водоема-

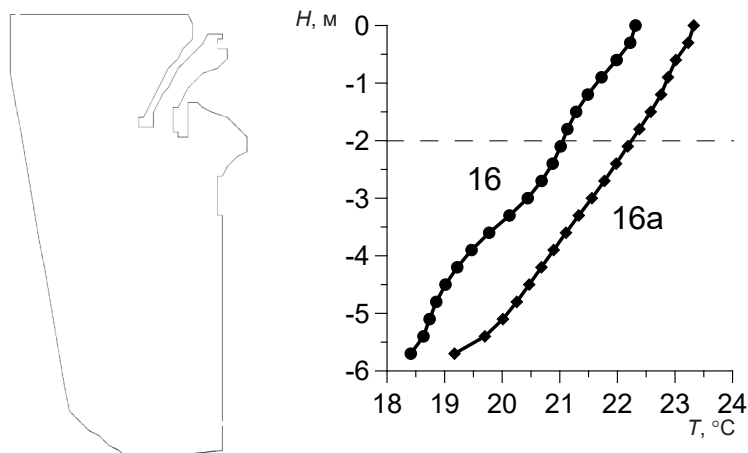


Рис. 11. Распределения температуры по глубине вблизи насосных станций в точках 16 и 16а для режима работы в аварийной ситуации

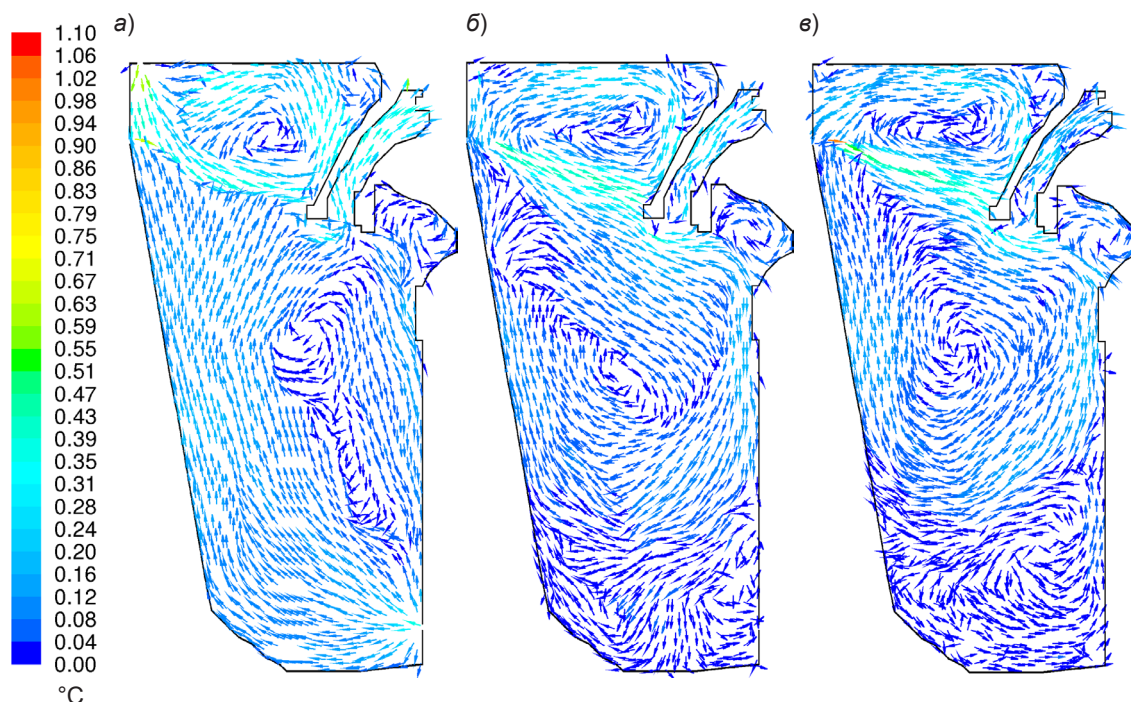


Рис. 12. Векторные поля скорости воды на поверхности (а), на глубине 2 м от поверхности (б) и на глубине 3 м от поверхности (в) в замкнутой системе резервуара-охладителя для штатного режима сброса отработанной воды. Расчетное время 3 суток с начала отведения теплой воды

приемника позволяют сделать вывод о том, что для эффективного функционирования системы охлаждения необходим больший забор холодной воды из внешнего участка водохранилища по отношению к резервуару-охладителю. Такая схема позволяет обеспечить устойчивость функционирования в течение трех суток.

Селективный забор охлажденной воды из нижних горизонтов внешнего участка водохранилища по отношению к резервуару-охладителю позволяет значительно снизить температуру воды, забираемой на насосных станциях. В случае, когда поступление холодной воды недостаточно для эффективного разбавления теплой отработанной воды, при экстремальных метеоусловиях, одной из мер бесперебойной работы системы охлаждения является селективный забор из придонного горизонта резервуара-охладителя путем заглубления щитов-отсекателей. Данная схема на основе селективного забора воды из нижних горизонтов резервуара-охладителя позволяет обеспечивать устойчивость функционирования рассматриваемой системы охлаждения до десяти суток в период наблюдения экстремально высоких температур воздуха. Результаты расчетов могут быть использованы

для выработки рекомендаций по повышению устойчивости системы оборотного водоснабжения предприятия в наиболее жаркие лимитирующие периоды путем селективного забора воды из придонных наиболее охлажденных горизонтов резервуара-охладителя.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-77-20093).

Литература

1. Вольцингер, Н. Е., Андросов, А. А., Клеванный, К. А. и Сафрай, А. С. (2018). Океанологические модели негидростатической динамики. Обзор. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, Т. 11, № 1, сс. 3–20. DOI: 10.7868/S207366731801001X.
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. K. and Whiles, M. R. (2010). *Freshwater ecology. Concepts and environmental applications of limnology*. 2nd edition. Cambridge: Academic Press, 829 p. DOI: 10.1016/C2009-0-01718-8.
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, No. 1, art. 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. In: Zelinka, I., Vasant, P. and Barsoum, N. (eds) *Power, Control and Optimization. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 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, Issue 2, pp. 390–397. DOI: 10.1134/S1062739148020220.

11. Lesieur, M., Métais, O. and Comte, P. (2005). *Large-eddy simulations of turbulence*. 1st edition. Cambridge: Cambridge University Press, 232 p. DOI: 10.1017/CBO9780511755507.

12. Lyubimova, T., Lepikhin, A., Kononov, 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 in 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. Lyubimova, T., Lepikhin, A., Parshakova, Ya., Lyakhin, Yu. and Tiunov, A. (2019). Application of hydrodynamic modeling in 2D and 3D approaches for the improvement of the recycled water supply systems of large energy complexes based on reservoirs-coolers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 140, pp. 897–908. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.105.

16. 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.

17. 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, Issue 10, pp. 4228–4234. DOI: 10.1021/es103230n.

18. Råman Vinnå, 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.

19. 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.

20. 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.

21. Thomas, A., 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.

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

References

1. Voltzinger, N. E., Androsov, A. A., Klevanny, K. A. and Safrai, A. S. (2018). Oceanological models of non hydrostatic dynamics. A review. *Fundamental and Applied Hydrophysics*, Vol. 11, No. 1, pp. 3–20. DOI: 10.7868/S207366731801001X.

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. K. and Whiles, M. R. (2010). *Freshwater ecology. Concepts and environmental applications of limnology*. 2nd edition. Cambridge: Academic Press, 829 p. DOI: 10.1016/C2009-0-01718-8.

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, No. 1, art. 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. In: Zelinka, I., Vasant, P. and Barsoum, N. (eds) *Power, Control and Optimization. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 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, Issue 2, pp. 390–397. DOI: 10.1134/S1062739148020220.

11. Lesieur, M., Métais, O. and Comte, P. (2005). Large-eddy simulations of turbulence. 1st edition. Cambridge: Cambridge University Press, 232 p. DOI: 10.1017/CBO9780511755507.

12. Lyubimova, T., Lepikhin, A., Kononov, 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 in 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. Lyubimova, T., Lepikhin, A., Parshakova, Ya., Lyakhin, Yu. and Tiunov, A. (2019). Application of hydrodynamic modeling in 2D and 3D approaches for the improvement of the recycled water supply systems of large energy complexes based on reservoirs-coolers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 140, pp. 897–908. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.105.

16. 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.

17. 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, Issue 10, pp. 4228–4234. DOI: 10.1021/es103230n.

18. Råman Vinnå, 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.

19. 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.

20. 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.

21. Thomas, A., 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.

22. Wu, J. (1969). Wind stress and surface roughness at air-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

Лепихин Анатолий Павлович, д-р геогр. наук, профессор

Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

E-mail: lepihin49@mail.ru

Ляхин Юрий Сергеевич, канд. техн. наук
Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

E-mail: ljahin85@mail.ru

Authors

Lyubimova Tatyana Petrovna, Dr. of Science in Physics and Mathematics, Professor

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia

E-mail: lyubimovat@mail.ru

Parshakova Yanina Nikolaevna, PhD of Science in Physics and Mathematics

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia

E-mail: parshakova@icmm.ru

Lepikhin Anatoly Pavlovich, Dr. of Science in Geography, Professor

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

E-mail: lepihin49@mail.ru

Lyakhin Yury Sergeevich, PhD of Technical Science
Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

E-mail: ljahin85@mail.ru