

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ УСТОЙЧИВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ВОДНЫХ МАСС

Любимова Т.П., *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

Лепихин А.П., *Горный институт УрО РАН, Пермь*

Паршакова Я.Н., *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

Богомолов А.В., *Горный институт УрО РАН, Пермь*

Гидротехническое регулирование основывается на оперативном управлении уровнями и расходами. Базовым, но далеко не совершенным вариантом таких действий выступает технология форсированной промывки водоема, приуроченная к пику естественного притока – весеннему половодью. Классический подход здесь предполагает заблаговременное понижение уровня воды до минимально допустимой отметки (уровня мертвого объема) с последующим пропуском паводковых вод через водосливной фронт. Теоретически такой механизм должен обеспечивать вынос загрязнённых вод из придонных горизонтов. Однако на практике для условий Верхне-Зырянского гидроузла результативность данной методики резко снижается из-за конструктивных особенностей водосбросного тракта. Сооружение оснащено шахтным водосливом, порог которого расположен на отметке, близкой к нормальному подпорному уровню (НПУ). Как было установлено ранее, в условиях устойчивой плотностной стратификации наиболее минерализованные слои локализуются в придонной толще. При существующей конструкции водосброса промываются водные массы, формирующиеся на поверхностном и промежуточном горизонтах. При прохождении паводка в нижний бьеф сбрасываются наиболее пресные воды нормативного качества, тогда как глубинные высокоминерализованные воды, представляющие наибольшую опасность для обеспечения устойчивого технического водоснабжения, остаются гидравлически запертыми в понижениях рельефа дна и продолжают аккумулироваться. Традиционный вариант промывки приводит к неэффективному расходованию паводкового потенциала, поскольку не дает эффекта снижения общей минерализации забираемой воды. Принципиально иным подходом к решению задачи, позволяющим устранить указанные конструктивные недостатки, служит парадигма селективного (избирательного) водоотведения. Наиболее перспективной и технологически обоснованной реализацией данной концепции выступает создание специализированного паводкового водосброса сифонного типа, ориентированного на отведение высокоминерализованных вод из самых глубоких зон водохранилища. В рамках настоящей работы построена численная модель и проведена серия вычислительных экспериментов, направленная на детализацию инженерных решений обеспечения устойчивого технического водообеспечения в условиях значительной стратификации водных масс.

Ключевые слова: водные объекты, моделирование качества воды, вертикальная стратификация водных масс, селективный водосброс

Введение

Регулирование режима водных объектов как инструмент управления водными ресурсами является общепринятой мировой практикой [1, 2]. Ключевым параметром, определяющим гидрологический режим и качество воды в таких системах, выступает пуск из водохранилища. От него зависит не только выработка гидроэлектроэнергии

и поддержание уровней в периоды половодья и паводков, но и процессы санации водных масс. При этом для отдельных участков водохранилищ характерно проявление стратификационных эффектов. Они обусловлены неоднородностью полей температуры и минерализации воды, формируемых в водохранилищах.

Изучению плотностных течений посвящено большое количество натурных наблюдений, лабораторных опытов и вычислительных экспериментов [3-9]. Экспериментальные изыскания, дополняющие теоретическую базу, представлены в трудах [10-12]. На начальном этапе модельные исследования концентрировались на наклонных каналах простой прямоугольной формы. Стремясь заложить основы для понимания сложных процессов, авторы первых аналитических моделей нередко прибегали к ряду упрощающих допущений [13-16].

На современном этапе фокус внимания сместился в сторону моделирования плотностных течений, воспроизводящих реальную геометрию водотоков и акваторий [17, 18].

Исследования последних лет подчеркивают многообразие факторов, инициирующих плотностную стратификацию. Так, в работе [19] продемонстрировано, что в условиях поступления в водохранилище сразу нескольких рек плотностные течения формируются за счет разницы не только температур, но и химического состава вод. Холодные притоки формируют придонные шлейфы, тогда как теплые воды растекаются в поверхностном слое, а на участках встречи течений возникают застойные зоны, создающие благоприятные условия для эвтрофикации. Механизм формирования крупномасштабных солевых вихрей при слиянии потоков с разной минерализацией детально раскрыт в исследовании [20]. Классические работы [21] и [22] остаются важными для понимания гидродинамики стратифицированных водохранилищ и теории селективного отбора.

Контроль качества воды в водоемах со стратификацией обычно достигается за счет избирательного отбора воды из определенных горизонтов либо посредством управления режимом сброса, позволяющим минимизировать негативные последствия стратификации. Селективный водозабор характеризуется отводом воды из определенной толщины вблизи водозабора. Значительное число современных исследований посвящено оптимизации систем селективного водозабора с использованием гидродинамических моделей разной размерности.

В качестве наглядного примера в настоящей статье рассматривается система технического водоснабжения промышленного предприятия, забирающего воду из Верхне-Зырянского водохранилища. Проведенные полевые исследования (включая батиметрическую и кондуктометрическую съемку) выявили значительную вертикальную неоднородность водных масс, которая на практике выражалась в существенных сезонных колебаниях солесодержания на водозаборе. Для оценки масштабов и устойчивости этой стратификации при разных гидрологических режимах и была разработана гидродинамическая модель.

Объект исследования

Для целей обеспечения устойчивого водоснабжения отдельных предприятий создаются небольшие водохранилища. Одним из таких водоемов является Верхне-Зырянское водохранилище. Оно расположено в 3,5 км юго-восточнее города Березники.

Водохранилище построено и введено в постоянную эксплуатацию в 1969 году. Помимо промышленного водоснабжения, водоем имеет еще рекреационное значение для местного населения.

Бассейн реки Зырянка расположен в северной части бассейна реки Камы. Реки рассматриваемой территории относятся к типу рек с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и длительной устойчивой зимней меженью. В питании рек преимущественное значение имеют снеговые воды. Весеннее половодье на водотоке начинается в середине апреля, заканчивается к концу мая – началу июня. Продолжительность половодья составляет до 40 суток. Летне-осенняя межень устанавливается к середине июня и длится до конца октября. Устойчивый ледостав устанавливается в ноябре и длится до середины апреля.

Правилами использования водных ресурсов Верхне-Зырянского водохранилища, утвержденными Приказом Федерального агентства водных ресурсов от 29 ноября 2023 года № 288 [2] установлены нормативные уровни воды водоема: нормальный подпорный уровень (НПУ) и уровень мертвого объема (УМО). Они соответственно составляют: НПУ – 124,0 м БС, УМО – 121, 0 м БС. Полная статическая емкость водохранилища при нормальном подпорном уровне (НПУ) составляет 12,8 млн м³, тогда как емкость при уровне мертвого объема (УМО) равна 3,73 млн м³. Соответственно, полезный объем водохранилища, определяемый как разность между полным и мертвым объемами, при НПУ не превышает 9,1 млн м³. Ширина водохранилища в приплотинной части достигает 870 м, при этом максимальные глубины, составляющие 10–11 м, приурочены к участкам затопленного русла. Средняя глубина водохранилища не превышает 3,7 м, что можно видеть из Рисунка 1, на котором представлено распределение глубин по акватории Верхне-Зырянского водохранилища по данным батиметрической съемки «ГИ УрО РАН» 2025 года. Площадь зеркала водоема изменяется от 3,49 до 2,41 км².

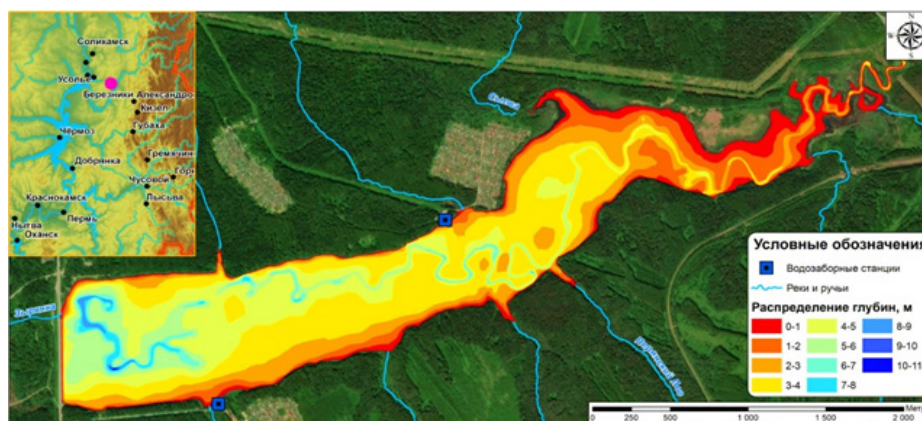


Рис. 1. Распределение глубин по акватории Верхне-Зырянского водохранилища в соответствии с данными батиметрической съемки «ГИ УрО РАН»

В естественных условиях гидрохимический облик рек исследуемой территории преимущественно определяется гидрокарбонатно-кальциевыми и гидрокарбонатно-сульфатными фациями, что обусловлено природными геохимическими особенностями региона. Предуралья с минерализацией 200 – 500 мг/дм³. При этом для вод рассматриваемого водного объекта характерна существенная внутригодовая

изменчивость качества воды. Наиболее высокие концентрации макрокомпонентов солевого состава в водохранилище отмечаются в период зимней межени (ледостава), когда основное питание водного объекта происходит за счет подземных вод.

Методы и материалы натурного исследования

В рамках проведенного исследования оценивалась пространственная, в том числе вертикальная, неоднородность водных масс. Было проведено несколько серий полевых работ в периоды зимней и летней межени.

Исследование вертикальной неоднородности водных масс наиболее удобно проводить с использованием показателя «удельной электропроводности воды», измеряемой, как правило, в [мкСм/см]. В общем случае величина удельной электропроводности воды определяется составом растворенных ионов, их концентрацией, а также температурой воды. Природные воды представляют в основном растворы смесей сильных электролитов. Минеральную часть воды составляют ионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- . В связи с этим, для оперативного контроля состояния водных масс широкое применение получил показатель удельной электропроводности. Это связано с наличием практически линейной зависимости между содержанием ионов и удельной электропроводностью. Современные приборы для измерения электропроводности автоматически производят поправку на температуру воды, а измеряемые значения приводят к условной температуре $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$. Связь между общей минерализацией воды и удельной электропроводностью определяется стабильностью химического состава.

Исследование проводилось на протяжении пяти лет: 2020-2024 гг. Результаты исследований позволили получить целостную картину изменения удельной электропроводности в исследуемых створах Верхне-Зырянского водохранилища и выявить слои с повышенной минерализацией воды. На рисунках 2 и 3 представлены графики, иллюстрирующие изменение удельной электропроводности воды по глубине для двух участков водопользования (забора воды).

Как видно из рисунков, обнаружено наличие в придонных слоях зон с повышенной по сравнению с поверхностным слоем минерализацией, данная вертикальная стратификация отмечается как в период летней межени, так и в период зимней межени. Максимальные значения минерализации вблизи дна, достигающие 10-кратного увеличения, наблюдаются в период зимней межени. Интенсивный рост минерализации отмечается ниже отметки УМО водохранилища (121 м БС). Слой скачка электропроводности располагается на отметках 117,5-119,0 м БС. Максимальные величины удельной электропроводности были зафиксированы в марте 2020 и марте 2021 годов и достигали 10000 мкСм/см.

На рисунке 4 представлен поперечный профиль водохранилища, на котором также отчетливо видно изменение качества воды с глубиной: в глубоких зонах, приуроченных к участкам старого русла, наблюдается существенное увеличение удельной электропроводности, а значит и общей минерализации воды. Местоположение контрольной линии данного поперечного профиля отображено на рисунке 1.

Водозаборные оголовки на исследуемом водоеме располагаются в придонной области, что, с одной стороны, определяется необходимостью гарантированного обеспечения предприятия водой даже в условиях маловодных периодов, с другой стороны, тем, что в летний период дополнительным лимитирующим показателем качества воды становится температура, которая в поверхностных слоях на 15-20 $^\circ\text{C}$ выше придонной.

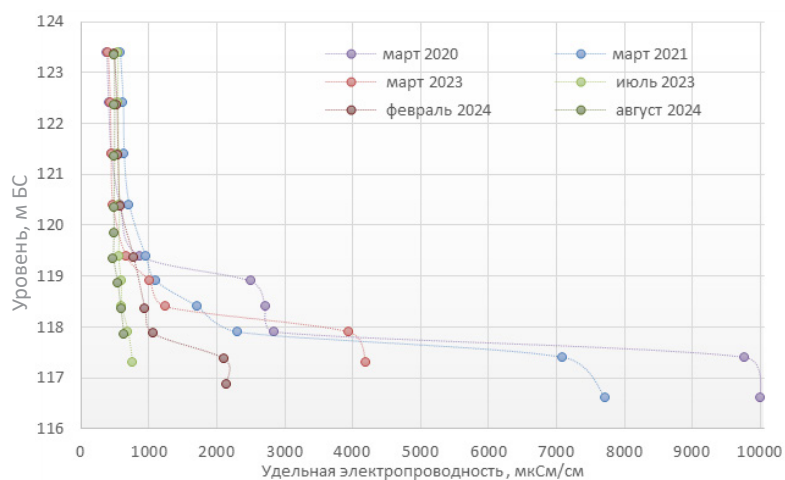


Рис. 2. Распределение величины удельной электропроводности воды за период 2020-2024 гг. для вертикали у водозабора №1

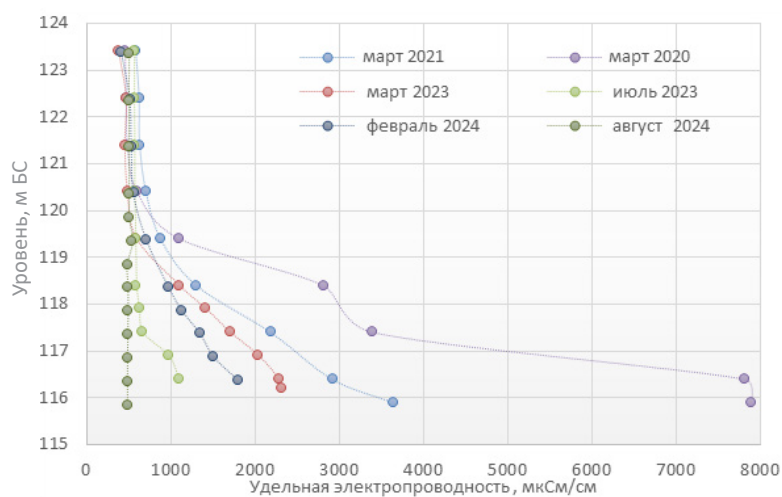


Рис. 3. Распределение величины удельной электропроводности воды за период 2020-2024 гг. для вертикали у водозабора №2

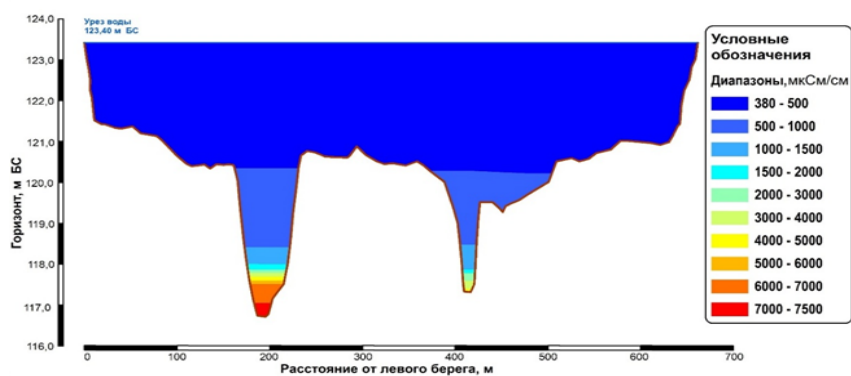


Рис. 4. Изменение величины удельной электропроводности в поперечном сечении Верхне-Зырянского водохранилища в марте 2023 г.

Формирование таких выраженных стратификационных эффектов обусловлено значительными различиями плотностей водных масс на разных глубинах. Плотность водных масс зависит от температуры, минерализации и давления. Качество воды определяется также содержанием взвешенных наносов. Роль давления становится заметной лишь на очень значительных глубинах. Для исследуемого водного объекта, максимальные глубины которого не превышают 12 м, данным фактором можно пренебречь ввиду его незначительности. Поскольку в весовом соотношении содержание взвешенных наносов в данном водном объекте значительно меньше минерализации воды, их ролью в формировании плотности водных масс также можно пренебречь. Таким образом, для исследуемого водоема основными детерминантами плотности выступают температура и минерализация воды [1, 2]. Поскольку природа этих двух факторов принципиально различна, в прикладных исследованиях часто выделяют доминирующий. Тем не менее, в водоемах, испытывающих сильное техногенное воздействие, необходимо комплексно учитывать оба параметра. Такой подход позволяет обнаруживать новые явления и по-новому интерпретировать уже известные процессы.

Решение этой задачи осложняется нелинейной зависимостью плотности от температуры. Дело в том, что пресная вода имеет максимальную плотность при 4°C, а с ростом минерализации эта температура меняется. Совместное влияние температуры и солености значительно увеличивает количество возможных сценариев формирования плотности. Эти факторы могут как усиливать, так и компенсировать друг друга, что приводит к большому разнообразию вертикальных профилей распределения параметров по глубине.

Поскольку скорость течения в этих водоемах низка ($V \leq 0,05$ м/с), даже незначительные градиенты плотности способствуют формированию устойчивых стратифицированных структур. Эти структуры оказывают решающее влияние на процессы формирования качества воды и определяют стабильность всей системы водопользования.

Предлагаемые мероприятия по улучшению гидрохимического режима водохранилища

Мероприятия, которые могут улучшить гидрохимический режим водохранилища, могут быть диверсифицированы по принципу воздействия и локализации на две основные группы:

1. Активные (оперативные) мероприятия. Направлены на прямое воздействие на водную массу в самом водохранилище с целью разового или периодического снижения концентрации растворенных веществ. Их сущность заключается в искусственной интенсификации водообмена и направленном удалении наиболее минерализованных слоев воды.

2. Пассивные (предупредительные) мероприятия. Направлены на минимизацию притока солей в водоем с площади водосбора. Включают в себя выявление и ликвидацию (или изоляцию) точечных и рассредоточенных источников загрязнения, организацию водоохраных зон, лесомелиорацию и т.д.

Применительно к Верхне-Зырянскому водохранилищу внедрение пассивных мер наталкивается на трудности принципиального характера. Поступление высокоминерализованных рассолов происходит не из локализованного точечного

источника, а в виде рассредоточенных выходов подземных вод или диффузного стока с засоленных территорий. Это делает процессы их идентификации и технологического подавления крайне сложными и дорогостоящими.

Таким образом, фокус практического внедрения смещается в сторону активных инженерных решений, реализуемых через модификацию режимов работы гидротехнического узла. Базовым активным мероприятием является промывка водохранилища в период прохождения максимального естественного стока – весеннего половодья. Традиционная методика предполагает предпаводковую сработку водохранилища до отметки «мертвого» объема с последующим пропуском паводковых вод через водосливные сооружения. Данный механизм должен приводить к разбавлению высокоминерализованных вод и транспортировке их в сторону нижнего бьефа. Однако эффективность данной методики для Верхне-Зырянского водохранилища существенно ограничена конструктивными особенностями водосбросного узла: водохранилище имеет водосброс шахтного типа автоматического действия, при котором гребень водослива располагается на отметке, близкой к НПУ. Как уже отмечалось выше, в условиях устойчивой плотностной стратификации наиболее минерализованные воды аккумулируются в придонном горизонте. При данном типе водосброса в нижний бьеф отводятся водные массы из верхних, средних слоев, т.е. в период паводка через него проходит преимущественно свежая, слабоминерализованная вода. Придонные рассолы при этом остаются в изолированном состоянии и продолжают накапливаться. Таким образом, традиционная промывка без селекции по глубине приводит к нерациональному использованию паводкового ресурса и не решает проблему кардинально, обеспечивая лишь временную и незначительную стабилизацию общего солесодержания.

Качественным технологическим скачком, позволяющим преодолеть описанные ограничения, является концепция организации селективного водосброса, обеспечивающего принудительный забор воды из придонной области водохранилища. Наиболее эффективной инженерной реализацией данной концепции является создание специализированного паводочного донного водосброса.

При проектировании водозаборная часть (входное оголовье) размещается в придонной зоне, в области максимальной концентрации солей. В период половодья данная система способна обеспечить забор высокоминерализованной воды с последующим ее сбросом в нижний бьеф. Это позволяет целенаправленно и с высокой эффективностью эвакуировать «рассольную подушку», что приводит к значительному снижению общей минерализации водохранилища и предотвращению конвективного перемешивания солей.

Важным инженерным аспектом является то, что организация подобной конструкции требует реконструкции существующего водослива. Это сопряжено с существенными капитальными вложениями, необходимостью временного изменения режима эксплуатации водохранилища и проведением комплексных изысканий. Для оценки эффективности данного мероприятия в рамках исследования предложен инструмент численного гидродинамического моделирования.

Численное моделирование в рамках предлагаемых мероприятий по улучшению гидрохимического режима водохранилища

Для рассмотрения влияния способа пропуска воды через плотину на положение слоя скачка минерализации по глубине проводилось трехмерное численное моделирование.

Рассматривалась модельная задача для реальной геометрии исследуемого объекта. Для построения расчетной сетки область моделирования, показанная на рисунке 5, по акватории разбивалась на четырехугольные ячейки с линейным размером 20 м. По глубине расчетная сетка строилась со сгущением ко дну водохранилища, максимальный размер составлял 0,3 метра, минимальный – 0,02 м, при этом число узлов по вертикали составляло 80. Общее число узлов расчетной сетки – 670000 узлов.

В начальный момент времени распределение концентрации по глубине считалось неравномерным:

$$C(z) = \begin{cases} 0.3 \text{ г/л, } z > 4, \\ 3.0 \text{ г/л, } z \leq 4. \end{cases} \quad (1)$$

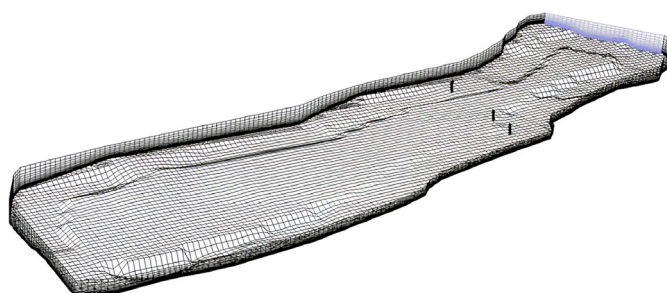


Рис. 5. Расчетная сетка участка моделирования Верхне-Зырянского водохранилища в трехмерной постановке. Длина участка 3 км

На рисунке 6 показано начальное распределение концентрации примеси в расчетной области. В первом варианте из выпускного устройства плотины при помощи поднятия шандор, нижняя часть которых расположена на глубине 4 метра от поверхности, с постоянной скоростью $\vec{v}$ вытекает вода. Во втором случае шандор поднят наверх на 4 м таким образом, что вода вытекает вблизи дна, глубинный водосброс. На входе расчетной области задается постоянный поток со скоростью $\vec{U}$, концентрация задается в виде скачка. Температура полагалась постоянной и равной значению на дне чаши: $T = 7^\circ\text{C}$.

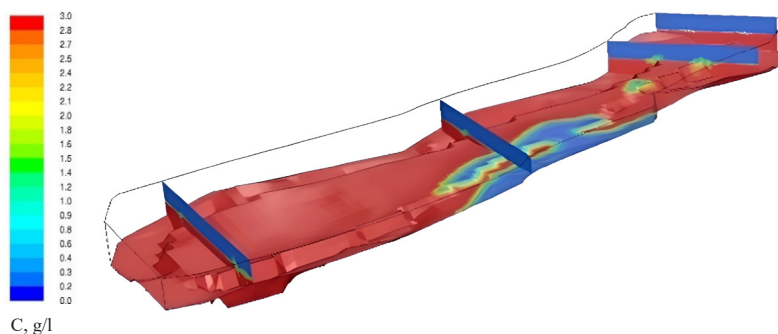


Рис. 6. Начальное распределение минерализации в створах Верхне-Зырянского водохранилища на дне и в вертикальных сечениях

Математическая модель

Для вычислений применялся метод конечных объемов. Расчеты проводились в рамках нестационарной неизотермической задачи до получения стационарного решения с относительной точностью 3.5×10^{-4} . Турбулентные пульсации описывались с помощью $(k-\varepsilon)$ -модели как наименее ресурсо- и времязатратной. Параметризация плотности воды в зависимости от минерализации и температуры производилась на основе уравнения состояния в виде степенной функции:

где

$$\rho = \rho_0 + A_c c + B_c c^{1.5} + D_c c^2 ,$$

$$\rho_0 = 999.843 + 0.067939 T - 0.009095 T^2 + 0.000169 T^3 ,$$

$$A_c = 0.824 - 0.004090 T + 0.000076 T^2 ,$$

$$B_c = -0.005726 + 0.000102 T , \quad C_c = 0.000483 .$$

Перепад плотности по глубине достигал 10%.

Уравнение баланса массы и импульса имело вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 , \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \right] + \rho g_i . \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) содержат следующие обозначения: ρ – плотность жидкости; v_i – компоненты скорости в декартовых координатах ($i = x, y, z$), при этом z – вертикальная координата, x и y – горизонтальные координаты, основной поток направлен вдоль x -координаты; μ – кинематическая вязкость жидкости; δ_{ij} – символ Кронекера. Турбулентная вязкость μ_t является функцией турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε : $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, где C_μ – константа.

Уравнения для нахождения турбулентной энергии и скорости ее диссипации записывались в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon , \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} . \quad (5)$$

В уравнениях (4) и (5) имеют место следующие обозначения: $G_k = \mu_t S^2$ – генерация турбулентной кинетической энергии за счет среднего градиента скорости; $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ – норма тензора средней скорости деформации потока, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)$; Pr_t – турбулентное число Прандтля; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k , σ_ε – константы.

В уравнение для турбулентной кинетической энергии входит член $G_b = - \frac{g_j (\mu_t / \rho)}{Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_j}$, описывающий генерацию турбулентной энергии за счет сил плавучести в поле силы тяжести. Поскольку вектор ускорения свободного падения $\mathbf{g}$ направлен вертикально вниз, в случае устойчивой плотностной стратификации ($\partial \rho / \partial x_3 < 0$) вышеуказанный член является отрицательным, что означает уменьшение турбулентной кинетической энергии при действии сил плавучести.

Применимость (k - ε)-модели турбулентности была проверена тестовыми расчетами с использованием модели более высокого порядка – модели Рейнольдса, в которой решаются семь дополнительных уравнений для напряжений Рейнольдса. Обнаружено, что для различных сеток отличие в полученных данных составляет менее 5% для интегральных значений компонент скорости в различных сечениях.

Уравнение переноса примеси записывалось в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} c) = -\nabla \cdot \mathbf{J}. \quad (6)$$

В уравнении (6) содержатся следующие обозначения: ∇ – оператор набла; $\mathbf{J}$ – вектор диффузионного потока примеси, определяемый выражением

$$\mathbf{J} = -\rho(D_m + D_t)\nabla c. \quad (7)$$

Здесь D_m – коэффициент молекулярной диффузии; D_t – эффективный коэффициент турбулентной диффузии, связанный с турбулентной вязкостью μ_t соотношением $D_t = (\mu_t/\rho)/Sc_p$, где Sc_p – турбулентное число Шмита.

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i \rho C_p T] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\kappa_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right), \quad (8)$$

где C_p – удельная теплоемкость, κ_{eff} – эффективная теплопроводность, $(\tau_{ij})_{eff}$ – девиатор тензора напряжений

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}, \quad (9)$$

при этом $\mu_{eff} = \kappa_{eff} Pr/C_p$ – эффективная вязкость, определяемая через эффективную теплопроводность: $\kappa_{eff} = \kappa + C_p \mu_t / Pr_t$, где κ – коэффициент теплопроводности.

Граничные условия, при которых решалась задача (1)–(9), приведены ниже для разных границ системы:

– на дне и берегах чаши, то есть на жестких границах, предполагалось выполнение условий прилипания и нулевого потока массы:

$$v_x = v_y = v_z = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad T = T_0; \quad (10)$$

– на входе в расчетную область задавалась скорость основного потока (вектор скорости потока окружающей среды перпендикулярен входной границе $\mathbf{U} = \{U, 0, 0\}$); концентрация устанавливалась равной фоновой концентрации загрязняющего вещества в воде:

$$v_x = U, \quad v_y = 0, \quad v_z = 0, \quad c = c_0, \quad T = T_0 + z(T_a - T_0)/H; \quad (11)$$

– верхняя граница области, соответствующая свободной поверхности жидкости, полагалась недеформируемой; на ней считались отсутствующими нормальная компонента скорости жидкости, касательные напряжения и поток примеси:

$$(\mathbf{v} \mathbf{n}) = 0, \quad \frac{\partial v_x}{\partial x_z} + \frac{\partial v_z}{\partial x_x} = 0, \quad \frac{\partial v_y}{\partial x_z} + \frac{\partial v_z}{\partial x_y} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0, \quad \kappa \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_e), \quad (12)$$

где h – коэффициент теплообмена, T_e – температура воздуха;

– на поверхности воды задавался линейный закон теплоотдачи, учитывающий нагрев поверхности от окружающего воздуха; коэффициент теплообмена выбирался на основании данных полевых измерений и составлял $100 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$;

– на выходе из расчетной области требовалось выполнение условия баланса массы:

$$\oint_{S_{in}} \rho v_{in} dS - \oint_{S_{out}} \rho v_{out} dS = 0. \quad (13)$$

Используемые при решении задачи (1)–(9) эмпирические константы и их значения брались из работы [9]: $Pr_t = 0.85$, $Sc_t = 0.7$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$. Кинематическая вязкость принималась равной $\mu = 9.34 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент молекулярной диффузии составлял $D = 1.0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Для коэффициента шероховатости дна реки взято значение 0.035, которое соответствует однородной поверхности песчаных зерен и их диаметру 0.001 м. При получении дискретных аналогов разрешающих уравнений применялись конечные объемы с «привязкой» переменных к центрам граней. При выполнении пространственной дискретизации уравнений схема имела второй порядок точности. Временная эволюция моделировалась на основе явной схемы второго порядка аппроксимации.

Численное моделирование осуществлялось с использованием программного пакета ANSYS Fluent на вычислительном кластере URAN Института математики и механики им. Н.Н. Красовского (ИММ УрО РАН, Екатеринбург, Россия).

Временной шаг $\Delta t = 0.5 \text{ с}$ задавался с автоматическим дроблением при нарушении критерия Куранта–Фридрихса–Леви. Использовалось количество итераций на временном слое: до 20 итераций метода SIMPLE (или явного прогноза-коррекции) для уравнений движения. Обработка сетки вблизи дна проводилась с использованием пристеночных функций с $y^+ \approx 30$ и сгущением сетки (первый узел на расстоянии 0.05 м от дна).

Результаты численного моделирования

Рассматривались два сценария пропуска воды: поверхностный и придонный. В поверхностном пропуске водопропускное устройство опускается так, что вода истекает от участка, расположенного на 1 метр от свободной поверхности. При глубинном пропуске вода вытекает снизу на расстоянии 1 м от дна. Расход сброса воды соответствует среднемесячному расходу за май месяц, когда проходит весенний паводок – $8,5 \text{ м}^3/\text{сек}$.

В результате численных экспериментов найдено, что при пропуске весеннего паводка в случае сброса воды вблизи поверхности происходит определенная промывка водохранилища, однако расположение слоя плотностного скачка снижается незначительно. Это можно видеть на рисунке 7, на котором показано поле температуры и поле минерализации воды на расчетном участке Верхне-Зырянского водохранилища. Расчет проводился для 10 дней. Неоднородность температуры (Рис. 7(а)) способствует устойчивости слоя скачка. Более минерализованная вода расположена у придонных горизонтов (Рис. 7(а)). А значит, в оголовок водозабора будет поступать вода с низкой минерализацией лишь при расположении оголовка на расстоянии выше трех метров от дна.

В случае донного водовыпуска для ГТС Верхне-Зырянского водохранилища на протяжении пяти суток происходит практически полная промывка водохранилища, что можно видеть на рисунке 8. Снижение концентрации примеси на дне в два раза наблюдается в первые сутки. За пять суток минерализация снижается на порядок и распределение примеси становится практически однородным.

Обсуждение результатов

Проблема устойчивого роста уровня минерализации водной массы Верхне-Зырянского водохранилища выходит за рамки локального гидрохимического дисбаланса и представляет собой системный вызов для обеспечения надежности технического водоснабжения промышленных предприятий. Решение данной задачи

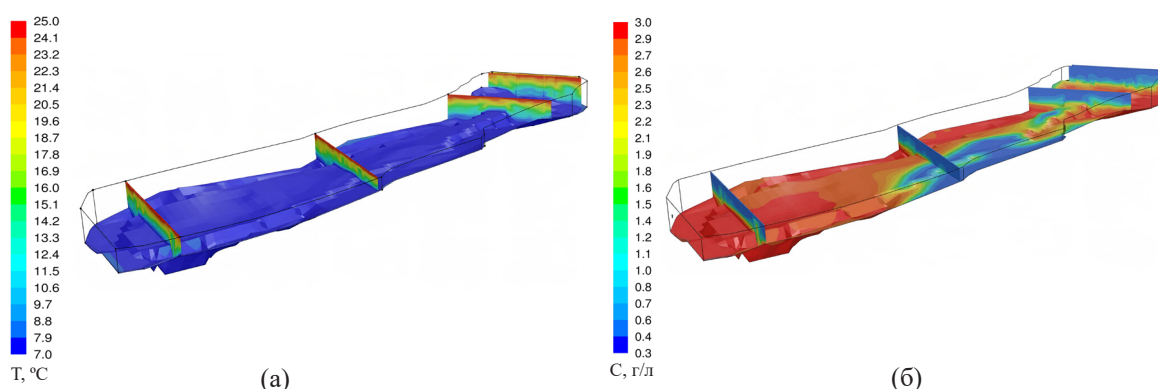


Рис. 7. Распределения температуры (а) и минерализации (б) в створах Верхне-Зырянского водохранилища на дне и в вертикальных сечениях в случае приповерхностного сброса воды из водохранилища

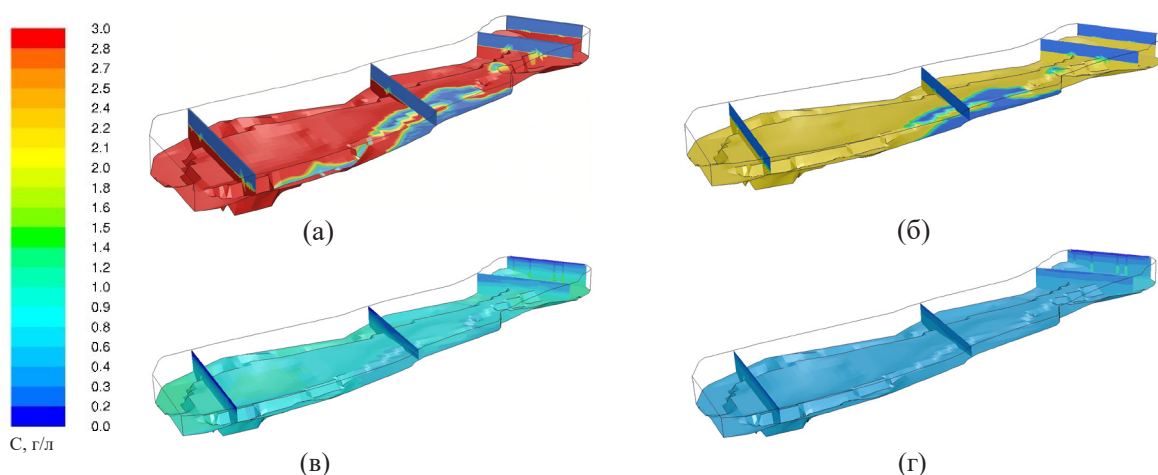


Рис. 8. Распределения минерализации в створах Верхне-Зырянского водохранилища на дне и в вертикальных сечениях в случае заглубленного сброса воды из водохранилища после: расчетное время (а) – 5 минут, (б) – 12 часов, (в) – двое суток, (г) – пять суток

не может быть сведено к единичному мероприятию, а требует разработки многоуровневой стратегии, интегрирующей природоохранные, гидротехнические и эксплуатационные меры. Проведенный комплексный анализ позволяет однозначно дифференцировать доступные инструменты воздействия на солевой режим по степени их эффективности, оперативности и ресурсоемкости.

В первую очередь, следует системно оценивать потенциал пассивных (организационно-мелиоративных) мероприятий, реализуемых непосредственно на площади водосбора. Несмотря на их несомненную стратегическую значимость, с точки зрения долгосрочного оздоровления экосистемы и снижения антропогенной нагрузки на притоки, их практическая применимость в текущей гидрологической ситуации сталкивается с серьезными ограничениями. Во-первых, внедрение почвозащитных технологий, лесоразведение и регулирование стока с сельхозугодий являются чрезвычайно капиталоемкими проектами с длительным лаг-периодом, измеряемым десятилетиями. Во-вторых, эффект от них носит вероятностный характер и сильно зависит от метеоусловий, что не позволяет гарантировать необходимого

снижения минерализации в критический для водопользования период. Таким образом, пассивные меры не могут рассматриваться в качестве инструмента оперативного купирования уже сформировавшегося очага засоления в придонной области водохранилища.

В противовес этому, активные технологические методы воздействия на внутриводоемные процессы демонстрируют способность обеспечить управляемый и быстрый эффект. В ходе исследований установлено, что наиболее радикальным и физически обоснованным способом борьбы с накоплением рассолов является организация селективного паводкового донного водосброса. Физический принцип данного метода заключается в использовании естественной стратификации водной толщи: более тяжелые и холодные высокоминерализованные слои воды локализуются у дна, и их целенаправленное удаление через нижние водопропускные отверстия позволяет эвакуировать основной объем солей без потери наиболее ценного поверхностного слоя пресной воды. Однако столь высокая технологическая эффективность сопряжена с существенными инженерно-строительными ограничениями. Практическая реализация селективного сброса невозможна без коренной реконструкции существующего гидротехнического узла, включая модернизацию затворных систем, оборудование глубинных водоприемников и переустройство нижнего бьефа, что требует тщательного технико-экономического обоснования и остановки водохранилища на период работ.

Критически важным этапом обоснования предложенных решений стало трехмерное численное моделирование гидродинамических и массопереносных процессов, которое подтвердило не только теоретическую состоятельность, но и высокую практическую эффективность донного водосброса. Согласно расчетным сценариям, инициирование селективного сброса с расходом, обеспечивающим радикальное обновление придонных слоев, приводит к стремительной перестройке поля концентраций. Уже в течение первых суток после начала операции фиксируется двукратное снижение содержания солей в придонном горизонте, что свидетельствует об активном вовлечении в удаление наиболее минерализованных вод. При сохранении режима форсированного водообмена на протяжении пяти суток моделируется снижение концентрации примеси на порядок (в десять раз) по сравнению с исходным фоном. Такой результат демонстрирует, что предлагаемый метод позволяет за короткий промежуток времени (в рамках одной паводковой волны) кардинально оздоровить придонную зону, предотвращая дальнейшее накопление токсичных солей и замедляя процессы вторичного загрязнения водной толщи.

Наряду с очисткой водохранилища, не менее остро стоит вопрос обеспечения нормативных показателей качества воды, подаваемой на технические нужды промышленных предприятий. Поскольку даже после частичного сброса рассолов градиент минерализации по глубине сохраняется, критически важным становится правильный выбор горизонта водозабора. Моделирование отчетливо показывает, что в активно промываемом слое, расположенном выше отметки порога водосброса, устойчивого роста минерализации не наблюдается; этот горизонт характеризуется постоянным водообменом и разбавлением за счет паводковых вод. Следовательно, для обеспечения нормативного сохранения качества забираемой на технические цели воды необходимо организовать ее забор именно из этой верхней части водной толщи, минуя высокоминерализованные нижние слои.

Заключение

Обобщая полученные данные, следует подчеркнуть, что долговременная устойчивость системы технического водоснабжения промышленных предприятий может быть гарантирована исключительно принципом селективного отбора воды. Достижение этого требования возможно по двум альтернативным, но взаимодополняющим направлениям: первое предполагает капитальное конструктивное изменение существующего водозаборного узла с обязательным повышением отметки расположения его оголовка выше уровня сезонного скачка плотности; второе – модификацию режима пропуска воды через гидроузел, позволяющую регулировать положение границы раздела слоев и смещать зону активного водообмена в сторону водоприемных отверстий. Выбор между этими вариантами определяется конкретными морфометрическими характеристиками водохранилища, доступным бюджетом реконструкции и требуемой производительностью системы. В совокупности предложенный комплекс мероприятий – от селективного сброса до точечной корректировки расположения оголовков водозабора – представляет собой научно обоснованный путь к достижению нормативных показателей качества воды в условиях возрастающих техногенных нагрузок.

Библиографический список

1. *Pisaturo G.R., Righetti M., Castellana C., Larcher M., Menapace A., Premstaller G.* A procedure for human safety assessment during hydropeaking events // *Sci. Total Environ.* – 2019. – Vol. 661. – P. 294-305.
2. *Ji Z.G.* Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. – P. 509-566.
3. *Hauenstein W., Dracos T.* Investigation of plunging density currents generated by inflows in lakes // *J. Hydraul. Res.* – 1984. – Vol. 22. – P. 157-179. – <https://doi.org/10.1080/00221688409499404>
4. *Alavian V.* Behavior of density currents on an incline // *J. Hydraul. Eng.* – 1986. – Vol. 112. – P. 27-42. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1986\)112:1\(27\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:1(27))
5. *Alavian V., Ostrowski Jr. P.* Use of density current to modify thermal structure of TVA reservoirs // *J. Hydraul. Eng.* – 1992. – Vol. 118. – P. 688-706. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:5\(688\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:5(688))
6. *Chikita K.* The role of sediment-laden underflows in lake sedimentation: glacier-fed Peyto Lake, Canada // *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. 7, Geophys.* – 1992. – Vol. 9. – P. 211-224.
7. *Cortés A., Rueda F., Wells M.* Experimental observations of the splitting of a gravity current at a density step in a stratified water body // *J. Geophys. Res. Ocean.* – 2014. – Vol. 119. – P. 1038-1053.
8. *Wells M.G., Wettlaufer J.S.* The long-term circulation driven by density currents in a two-layer stratified basin // *J. Fluid Mech.* – 2007. – Vol. 572. – P. 37-58.
9. *Wells M.G., Nadarajah P.* The intrusion depth of density currents flowing into stratified water bodies // *J. Phys. Oceanogr.* – 2009. – Vol. 39. – P. 1935-1947.
10. *Hallworth M.A. et al.* Entrainment into two-dimensional and axisymmetric turbulent gravity currents // *J. Fluid Mech.* – 1996. – Vol. 308. – P. 289-311.
11. *Dallimore C.J., Imberger J., Ishikawa T.* Entrainment and turbulence in saline underflow in Lake Ogawara // *J. Hydraul. Eng.* – 2001. – Vol. 127. – P. 937-948. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:11\(937\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:11(937))
12. *Amini Sola S., Naeeni S.T.O., Khavasi E., Faghihirad S.* Experimental study of venting efficiency of salinity current // *ISH J. Hydraul. Eng.* – 2023. – P. 1-9. – <https://doi.org/10.1080/09715010.2023.2180331>
13. *Kranenburg C.* Gravity current fronts advancing into horizontal ambient flow // *J. Hydraul. Eng.* – 1993. – Vol. 119. – P. 369-379. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1993\)119:3\(369\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:3(369))

14. *Fernandez R.L., Imberger J.* Relative buoyancy dominates thermal-like flow interaction along an incline // *J. Hydraul. Eng.* – 2008a. – Vol. 134. – P. 636-643. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:5\(636\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:5(636))
15. *Fernandez R.L., Imberger J.* Time-varying underflow into a continuous stratification with bottom slope // *J. Hydraul. Eng.* – 2008b. – Vol. 134. – P. 1191-1198. – [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:9\(1191\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:9(1191))
16. *Porcile G., Enrile F., Besio G., Bolla Pittaluga M.* Hydrostatic vs. non-hydrostatic modelling of density currents developing two dimensionally on steep and mild slopes // *Appl. Ocean Res.* – 2022. – Vol. 121. – 103085. – <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103085>
17. *Cheng Z., Constantinescu G.* Stratification effects on flow hydrodynamics and mixing at a confluence with a highly discordant bed and a relatively low velocity ratio // *Water Resour. Res.* – 2018. – Vol. 54. – P. 4537-4562. – <https://doi.org/10.1029/2017WR022292>
18. *Umar M., Rhoads B., Greenberg J.A.* Use of multispectral satellite remote sensing to assess mixing of suspended sediment downstream of large river confluences // *J. Hydrol.* – 2018. – Vol. 556. – P. 325-338. – <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.02>
19. *Ryu I., Yu S., Chung S.* Characterizing Density Flow Regimes of Three Rivers with Different Physicochemical Properties in a Run-Of-The-River Reservoir // *Water.* – 2020. – Vol. 12. – 717. – <https://doi.org/10.3390/w12030717>
20. *Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Y., Konovalov V., Tiunov A.* Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // *J. Hydrol.* – 2014. – Vol. 508. – P. 328-342. – <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.041>
21. *Lepikhin A.P., Voznyak A.A., Lyubimova T.P., Parshakova Ya.N., Lyakhin Yu.S., Bogomolov S.V.* Studying the Formation Features and the Extent of Diffuse Pollution Formed by Large Industrial Complexes: Case Study of the Solikamsk–Berezniki Industrial Hub // *Water Resour.* – 2020. – Vol. 47. – P. 744-750. – <https://doi.org/10.31857/S0321059620050120>
22. *Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С., Исахов А.* Особенности гидродинамики водоемов с вертикальной плотностной неоднородностью водных масс в условиях активного техногенеза // *Вычислительная механика сплошных сред.* – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 115-124. – <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2023.16.1.9>

Благодарности:

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-535 от 23 апреля 2024 г.).

Для цитирования:

Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В. Гидродинамические аспекты инженерных решений устойчивого технического водопользования в условиях значительной стратификации водных масс // *Вестник Пермского федерального исследовательского центра.* – 2026. – № 3. – С. 33–48. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.2>

Сведения об авторах:

Любимова Татьяна Петровна, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией вычислительной гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1; e-mail: lyubimova@icmm.ru, ORCID: 0000-0002-8212-2890

Лепихин Анатолий Павлович, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: lepihin49@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9874-3424

Паршакова Янина Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: parshakova@icmm.ru, ORCID: 0000-0002-0234-3854

Богомолов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем гидрологии суши, «ГИ УрО РАН»; e-mail: whitewing85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0626-4069

COMPUTATIONAL HYDRODYNAMIC ASPECTS OF ENGINEERING SOLUTIONS ENSURING THE DETERMINATION OF TECHNICAL WATER USE UNDER CONDITIONS OF STABLE STRATIFICATION

Lyubimova T.P.¹, Lepikhin A.P.², Parshakova Ya.N.¹, Bogomolov A.V.²

¹*Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm*

²*Mining Institute UB RAS, Perm*

Hydraulic regulation is based on the operational management of water levels and flows. A basic, though far from perfect, approach to such measures is the technology of forced reservoir flushing timed to coincide with the peak natural inflow that is the spring flood. The classic approach here involves preemptively lowering the water level to the minimum permissible mark (dead volume level), followed by passing floodwaters over the spillway. Theoretically, such a mechanism should ensure the removal of polluted water from near bottom horizons. However, in practice, the effectiveness of this method for the conditions of Verkhne-Zyryansky hydroelectric complex, is significantly reduced due to the design features of the spillway. The structure is equipped with a shaft spillway, the threshold of which is located at an elevation close to the normal headwater level (NHL). As previously established, under conditions of stable density stratification, the most mineralized layers are localized in the bottom layer. With the existing spillway design, water masses forming in the surface and intermediate horizons are flushed out. As the spillway passes, the freshest waters of standard quality are discharged into the tailwater, whereas the deep, highly mineralized waters, which pose the greatest threat to a sustainable industrial water supply, remain hydraulically trapped in depressions in the bottom relief and continue to accumulate. The traditional flushing method results in an inefficient use of flood potential, as it fails to reduce the overall mineralization of the withdrawn water. A fundamentally different approach to solving the problem, enabling the elimination of the aforementioned design flaws, is the paradigm of selective water drainage. The most promising and technologically sound implementation of this concept is the construction of a specialized siphon-type flood spillway designed to drain highly mineralized waters from the deepest zones of the reservoir. In this work, a numerical model was developed and a series of computational experiments were conducted to refine engineering solutions for ensuring a sustainable technical water supply under conditions of significant stratification of water masses.

Keywords: *water bodies, water quality modeling, vertical stratification of water masses, selective spillway*

Поступила в редакцию: 15.07.2026

Принята к публикации: 27.08.2026