

Проведенный анализ температурных данных за два периода (1951-99 гг. и 2000-23 гг.) показал, что в настоящее время наблюдается устойчивое повышение среднегодовой многолетней температуры воздуха на территории г. Кунгура, это не могло не отразиться на изменении микроклимата Кунгурской Ледяной пещеры. Из-за особенностей циркуляции воздуха, использования разных режимов проветривания наибольшее влияние на изменение среднегодовых температурных показателей за последние двадцать лет испытали гроты привходовой и выходной части пещеры. И хотя за последние десятилетия безморозных периодов стало больше и среднемноголетняя температура января повысилась на 2,5°C, в зимний период во всех зонах отмечается понижение среднемесячных температур по сравнению с предыдущим периодом исследований (1951-99 гг.). В то же время, при анализе последних данных (2000-23 гг.) отмечен тренд понижения среднегодовых температур в гротах зоны переходных температур и зоны постоянных положительных температур.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России  
в рамках государственного задания  
(регистрационный номер НИОКТР 1022040500583-2-1.5.6).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кадебская О.И. Геоэкологическое состояние Кунгурской Ледяной пещеры и прилегающей территории, ее охрана и рациональное использование: автореф. дис. ...канд. геогр. наук. 25.00.36: защищена 02.12.04 / Кадебская Ольга Ивановна. – Пермь, 2004. – 27 с.
2. Катаев В.Н., Кадебская О.И. Геология и карст города Кунгура: монография. / ПГУ, ГИ УрО РАН. – Пермь, 2010. – 249 с.: ил.
3. Красиков А.В., Казанцева А.С., Богомаз М.В. Многопрофильный мониторинг в Кунгурской Ледяной пещере // Горн. журн. – 2018. – № 6. – С. 60-64.
4. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / ГИ УрО РАН; под ред. В.Н. Дублянско-го; [отв. ред. А.И. Кудряшов]. – Екатеринбург, 2005. – 376 с.: ил.

УДК 556.5.07

DOI:10.7242/echo.2024.1.2

### ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЗОНЫ ВЫКЛИНИВАНИЯ ПОДПОРА КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ г. БЕРЕЗНИКИ

А.П. Лепихин, М.А. Опутин  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** Показаны особенности влияния гидрологического режима Камского водохранилища на устойчивость систем технического водоснабжения г. Березники. Так как наблюдаемые характеристики уровня режима по гидропостам пгт. Тюлькино и г. Березники не отражают действительное распределение уклонов водной поверхности на изучаемом участке, было проведено соответствующее численное гидрологическое моделирование. В качестве рабочего инструмента для оценки распределения уклонов была использована модель в HEC-RAS. Представлены расчеты для различных сценариев, в том числе тех, при которых наблюдается вертикальная стратификация водных масс на водозаборе АО «БСЗ», изменения притока и уровней воды на Камском водохранилище. Показаны условия, при которых возможны наблюдаемые «залповые» повышения концентрации хлоридов в забираемых на водозаборах водных массах.

**Ключевые слова:** водохранилище, подпор, расход воды, неоднородность водных масс, вертикальная стратификация, гидрологические модели.

## Введение

Водоснабжение промышленных предприятий Соликамско-Березниковского промузла в значительной мере осуществляется из поверхностных водных объектов, в первую очередь из р. Камы (Камского водохранилища). Характерной особенностью гидрохимического режима р. Камы (Камского водохранилища) в районе г. Березники является наблюдаемая в теплый период значительная вертикальная неоднородность водных масс. Поскольку водозаборы предприятий располагаются в придонном слое, в частности, водозабор АО «БСЗ», проблема скопления высокоминерализованных рассолов в данных слоях, вследствие вертикальной стратификации, является острой. Как показано в [1-2], механизм формирования вертикальной стратифицированной водной массы обусловлен гидрологическими особенностями рассматриваемого участка Камского водохранилища, а именно расположением участка в зоне переменного подпора, для которого характерны существенные изменения высотных отметок и уклонов водной поверхности. Также важным фактором, определяющим особенности гидрохимического режима, является его расположение в зоне активного техногенеза, наличие существенных фильтрационных разгрузок, обусловленных комплексом естественных и техногенных факторов [3]. Гидрологические особенности зоны переменного подпора на Камском водохранилище рассматривались в работе [4], однако только с феноменологических позиций. Поэтому есть необходимость в более детальном изучении особенностей формирования гидродинамического режима рассматриваемого участка водохранилища, установление условий, при которых возникает переменный подпор, и неоднородное распределение уклонов по длине водоема.

## Материалы и методы

В качестве исходных данных использовались материалы наблюдений за уровнями и расходами воды на гидрологических постах пгт. Тюлькино, г. Березники и КамГЭС. Ключевую роль при оценке состоятельности рабочих гипотез играет анализ исходных данных. Наблюдается значительное различие в частоте проведения гидрологических и гидрохимических наблюдений. В настоящее время измерения содержания хлоридов проводятся с частотой  $\nu = 6/\text{сут}$ , действующие автоматические системы позволяют осуществлять контроль забираемой воды с частотой измерений  $72/\text{сут}$ . В то же время на ближайших гидрологических постах пгт. Тюлькино и г. Березники измерения проводятся только 1 раз в сутки – в 8 часов утра.

В связи со значительными внутригодовыми колебаниями уровней воды на Камском водохранилище (4-7 м), водозаборные окна предприятий расположены в глубинной части. Поэтому особенности вертикальной стратификации водных масс играют принципиальную роль в обеспечении устойчивости водопользования.

Как следует из рис. 1, наблюдается значительная асинхронность колебаний содержания хлоридов в воде в районе водозабора АО «БСЗ» и уклона водной поверхности. Максимальные концентрации хлоридов наблюдаются при минимальных уклонах. В период летней межени на Камском водохранилище наблюдаются небольшие расходы на основных притоках, в том числе по р. Каме. Вследствие этого на исследуемом участке наблюдаются небольшие уклоны водной поверхности, что в свою очередь определяет условия для формирования вертикальной неоднородности водных масс. В 2023 г. в связи с низкой водностью р. Камы и необходимостью поддержания уровня воды на отметках, близких НПУ (108.5 м БС), минимальные уклоны наблюдались весьма продолжительный период.



Рис. 1. График изменения концентрации хлоридов и уклона водной поверхности на участке от пгт. Тюлькино до г. Березники

Для оценки устойчивости стратификации водных масс в прикладных исследованиях, как правило, используется плотностное число Фруда  $Fr_p$  и непосредственно связанное с ним число Ричардсона. Впервые число Ричардсона для оценки устойчивости водных масс на рассматриваемой территории было применено Г.И. Куликовым [5]. Как показано в [1, 2, 5, 6], при значениях плотностных чисел  $Fr_p \sim 1,0$  наблюдается стратификация водных масс, т.е. в водном потоке не создаются кинетические условия для межслойного перемешивания:

$$Fr_p = \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \times H_n \times g}}, \quad (1)$$

где  $H_n$  – толщина нижнего слоя с повышенной минерализацией,  $V$  – средняя скорость течения,  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  – относительное различие плотностей рассматриваемых водных масс,  $g$  – ускорение свободного падения.

При возникновении вертикальной стратификации водных масс граница расслоения близка, как правило, к половине глубины потока [6]. Оценка для этих условий критического значения уклона водной поверхности, ниже которой может возникать устойчивая стратификация, рассматривается далее. Для этих целей можно воспользоваться в первом приближении соотношением Шези:

$$V = C\sqrt{R * I}, \quad (2)$$

где  $V$  – средняя скорость течения  $C$  – коэффициент Шези,  $R$  – гидравлический радиус,  $I$  – уклон водной поверхности.

В свою очередь, коэффициент Шези  $C$  определяется как:

$$C = \frac{1}{n} * R^{1/6}, \quad (3)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости,  $R$  – гидравлический радиус.

Подставляя соотношения (2, 3) в (1), имеем:

$$Fr_p = \frac{C\sqrt{H*I}}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \times (\frac{H}{2}) \times g}}. \quad (4)$$

Соответственно, для оценки критического значения уклона из соотношения (4), принимая, что начало формирования устойчивых стратификаций наблюдается при  $Fr_p \sim 1$ , имеем:

$$i_{кр} = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{Fr_p^2 \left(\frac{C}{\sqrt{g}}\right)^2 * 2}. \quad (5)$$

Принимая для р. Камы (Камского водохранилища) в районе г. Березники  $\left(\frac{C}{\sqrt{g}}\right) \sim 20$ , получаем  $i_{кр} \sim 1.25 * 10^{-6}$ . При таких уклонах может формироваться стратификация водных масс, негативно влияющих на качество забираемой воды предприятиями, в частности, АО «БСЗ». При этом возникает принципиальный вопрос, в чем причина несогласуемости данной оценки критических значений уклонов водной поверхности с результатами, представленными на рис. 1.

### Обсуждение результатов

Значения уклонов водной поверхности, полученные на основе анализа фактических данных и представленные на рис. 1, к сожалению, не отражают реальную картину распределения уклонов на всем участке от пгт. Тюлькино до г. Березники. Так как данный участок водохранилища находится в зоне переменного подпора, на нем возможен достаточно сложный характер как распределения гидравлических уклонов по протяженности рассматриваемого участка, так и его связи со скоростями течения.

Поэтому с целью получения объективной оценки фактических распределений уклонов водной поверхности между пгт. Тюлькино и г. Березники, были проведены гидравлические расчеты в 1D постановке с использованием программного продукта HEC-RAS 5.0 [7]. Для решения рассматриваемой задачи – оценки динамики распределения уровней воды на исследуемом участке водохранилища – данная постановка является оптимальной. В общем случае можно выделить несколько уровней решения гидродинамических задач сопряжения гидравлических уклонов со скоростным режимом водотока:

- 0-мерный (формула Шези), требующий минимальных вычислительных ресурсов;
- 1-мерный (HEC-RAS), характерное время расчетов современных вычислительных средств – 1 минута;
- 2-мерный (SMS), характерное время расчетов современных вычислительных средств – 2 часа;
- 3-мерный (Flow3D), характерное время расчетов современных вычислительных средств – 1 сутки.

Поскольку на рассматриваемом участке р. Кама (Камского водохранилища) изменение уклонов по ширине водного объекта незначительно, а также время расчётов моделей, создаваемых в HEC-RAS, минимально, применение гидродинамических моделей в 1-мерной постановке лучшим образом подходит для решения рассматриваемых в работе задач.

Расчеты были выполнены для следующих сценарных условий, наблюдаемых на изучаемом участке.

1. Стабильный поддерживаемый уровень НПУ (108.5 м БС) при постоянных значениях расхода притока.

2. Наблюдается суточное снижение притока воды на  $50 \text{ м}^3/\text{сек}$  при уровне воды на КамГЭС  $\sim 105.35 \text{ м БС}$ . Данный сценарий отражает гидрологические условия, при которых наблюдались резкие колебания содержания хлоридов в забираемой воде в октябре и ноябре 2023 г., представленные на рис. 1.
3. Стабильный уровень воды на отметке  $105.35 \text{ м БС}$  и постоянном притоке. Так как зимний период характеризуется низкими уровнями воды и устойчивыми зимними расходами воды, данный сценарий относится к холодному периоду.
4. Снижение притока на  $100 \text{ м}^3/\text{с}$  при относительно резких колебаниях уровней воды на  $0.15 \text{ м/сут}$  относительно НПУ ( $108.5 \text{ м БС}$ ). Данный сценарий охватывает летний период 2023 г., когда при эпизодическом снижении уклонов воды наблюдалось резкое повышение содержания хлоридов.

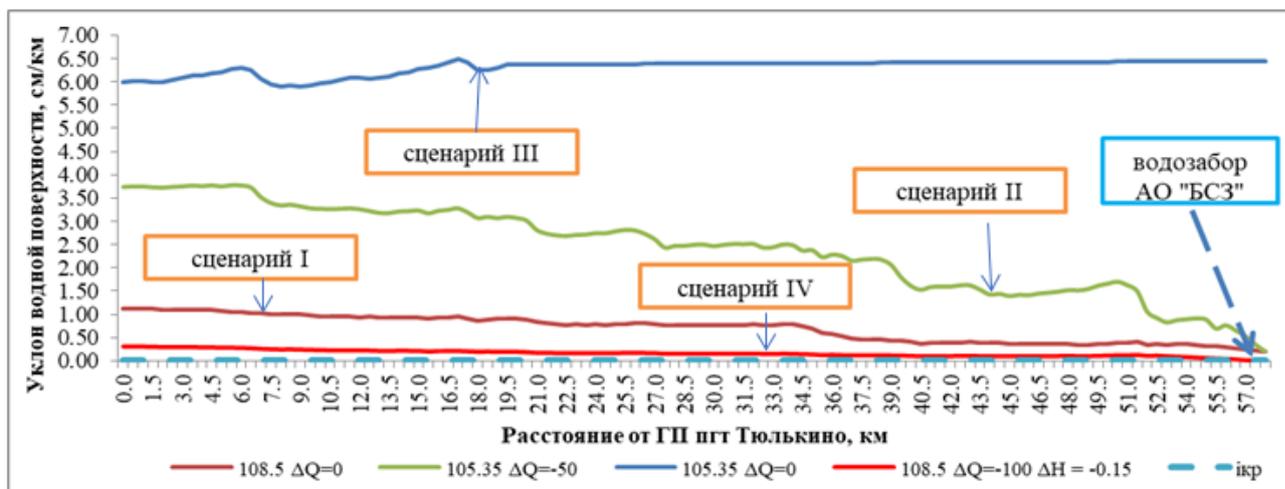


Рис. 2. График изменения уклона водной поверхности на участке от пгт. Тюлькино до г. Березники при реализации различных сценариев гидрологического режима

Критически низкие уклоны водной поверхности, при которых формируется вертикальная стратификация водных масс, определяются сочетанием двух факторов: уровнем воды, поддерживаемым на КамГЭС, и его межсуточными колебаниями. При одновременном снижении притока по р. Каме и снижении уровня воды КамГЭС наблюдаются минимальные уклоны.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что оценка гидравлических уклонов как разницы отметок уровней воды на двух смежных гидрометрических постах зоны выклинивания подпора Камского водохранилища некорректно. В рамках данного исследования с целью получения более объективных оценок распределению уклонов на участке р. Камы (Камского водохранилища) пгт. Тюлькино – г. Березники проведено численное моделирование на основе использования HEC-RAS. Модель применялась для установления условий формирования критических уклонов водной поверхности, при которых возможна вертикальная стратификация водных масс, значительно влияющих на устойчивость технического водоснабжения. Были рассмотрены и проанализированы четыре наиболее актуальных сценария изменения гидрологической ситуации на изучаемой акватории. Показано, что критические уклоны могут формироваться не только при уровнях воды, близких к НПУ  $108.5 \text{ м БС}$ , но и при более низких

уровнях, даже на 3 м. При этом определяющим фактором выступает снижение расходов притока воды по р. Каме.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500053-6).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лепихин А.П., Веницианов Е.В., Любимова Т.П., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В. Влияние вертикальной неоднородности водных масс на устойчивость промышленного водоснабжения в зонах высокой техногенной нагрузки // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2021. – № 4. – С. 53-63. – DOI: 10.17076/Lim1419.
2. 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. – DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.1.9.
3. Лепихин А.П., Возняк А.А., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В. Исследование особенностей формирования и масштабов диффузного загрязнения, сформированного крупными промышленными комплексами, на примере Соликамского-Березниковского промузла // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 5. – С. 560-566. – DOI: 10.31857/S0321059620050120.
4. Шайдулина А.А., Двинских С.А. Режим скоростей течения в районе переменного подпора Камского водохранилища // Географический вестник. – 2017. – №. 3 (42). – С. 61-70. – DOI: 10.17072/2079-7877-2017-3-61-70.
5. Куликов Г.И. Влияние сброса химической промышленности на минерализацию воды Камского водохранилища в районе г. Березники // Материалы всесоюзного совещания по вопросам эксплуатации Камского водохранилища. – Пермь, 1959. – Вып. 2. – С. 1-13.
6. Богомолов А.В., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Гребенева М.Г. Особенности колебаний вертикальных структур полей минерализации в Камском водохранилище в период летней межени в районе г. Березники // Горное эхо. – 2021. – № 4 (85). – С. 3-11. – DOI: 10.7242/echo.2021.4.1.
7. HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. Version 6.2 (CPD-69) / Gary W. Brunner. – December 2022. – 464 p.

УДК 504.054; 504.064.3

DOI:10.7242/echo.2024.1.3

### ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТЕЙ ДРЕЙФОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

А.И. Лучников, Т.Н. Синцова  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** Малые и средние водохранилища широко используются в нашей стране для обеспечения питьевых, промышленных и сельскохозяйственных нужд. Анализ возможных последствий загрязнения таких водных объектов вследствие залповых выбросов или аварийных ситуаций требует оценки скоростей распространения поллютантов и в первую очередь поверхностных скоростей течений. Как правило, доминирующим фактором в формировании поверхностных течений выступают ветровые нагрузки. Использование БПЛА открывает новые возможности оценки скоростей на таких водных объектах в Лагранжевой постановке. Представлены результаты таких оценок на примере Верхне-Зырянского водохранилища, активно используемого для технического водоснабжения промышленными предприятиями г. Березники.

**Ключевые слова:** скорость дрейфового течения, скорость ветра, беспилотные летательные аппараты, водохранилище, водопользование.