

УДК 628.1.034 + 628.113.1

ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ВОДНЫХ МАСС НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОМЫШЛЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В ЗОНАХ ВЫСОКОЙ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

**А. П. Лепихин¹, Е. В. Веницианов², Т. П. Любимова³,
А. А. Тиунов¹, Я. Н. Паршакова³, Ю. С. Ляхин¹,
А. В. Богомолов¹**

¹ Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия

² Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

³ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Устойчивость систем водоснабжения является одним из основных факторов, определяющих надежность функционирования крупных промышленных комплексов. Эта проблема рассматривается на примере филиала «Азот» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в городе Березники, осуществляющего забор свежей технической воды из р. Камы (Камского водохранилища). Характерной особенностью этого водного объекта является значительная изменчивость его гидрологического режима. В период летней межени он характеризуется низкими скоростями течений. В зимний период при снижении уровня воды в водохранилище наблюдается типичный речной режим. Кроме того, происходит сильное техногенное воздействие на водный объект. Нагрузка формируется в значительной мере за счет недеклалируемых рассредоточенных (диффузных) источников. Их характерной особенностью является высокая минерализация (а соответственно, плотность формируемых стоков) и поведение принципиально отличается от процессов разбавления и миграции стоков с нейтральной плавучестью. Для их описания нельзя использовать традиционные методы расчета процессов разбавления. Происходит формирование двухслойного течения, когда содержание основных ионов в поверхностном горизонте значительно меньше, чем в придонном слое. В начале июля 2020 г. на водозаборе филиала «Азот» наблюдалось существенное увеличение содержания ионов хлора и натрия, обусловивших остановку предприятия. Встал вопрос об установлении причин наблюдаемого явления. Возможными причинами могли быть аварийные сбросы из шламоохранилища «Белое море» концентрированных отходов на берегу или загрязнение сточными водами, поступающими в Каму ниже водозабора, за счет возвратных течений. Моделирование этих ситуаций удастся реализовать с учетом вертикальной неоднородности водных масс на основе сопряженного использования гидродинамических моделей в одно-, двух- и трехмерной (1D–2D–3D) постановке. В результате показано, что единственной причиной аварийной ситуации мог явиться забор воды из придонного течения р. Камы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: водохранилища; устойчивость водоснабжения; плотностная стратификация; моделирование.

A. P. Lepikhin, E. V. Venitsianov, T. P. Lyubimova, A. A. Tiunov, Ya. N. Parshakova, Yu. S. Lyakhin, A. V. Bogomolov. EFFECTS OF THE VERTICAL HETEROGENEITY OF WATER MASSES ON THE STABILITY OF INDUSTRIAL WATER SUPPLY IN INDUSTRY-INTENSIVE AREAS

The stability of water supply systems is one of the main factors for reliable operation of large industrial complexes. This problem is considered through the case of the Azot branch of JSC URALCHEM in the city of Berezniki, which derives raw process water from the Kama River (Kama storage reservoir). A characteristic feature of this water body is a highly variable hydrological regime. During the summer low water period, it is characterized by low current velocities. In winter, when the water level in the reservoir declines, a typical river flow regime is observed. In addition, the water body is exposed to heavy human impact. The bulk of the load comes from non-declared non-point (diffuse) sources. Their characteristic feature is high suspended solids content, and, accordingly, the density of the effluents. Their behavior is fundamentally different from the processes of dilution and migration of effluents with neutral buoyancy. Traditional methods of calculating dilution processes cannot be used to describe them. A two-layer flow is formed, where the content of basic ions in the surface horizon is more than an order of magnitude lower than near the bottom. Early in July 2020, a significant increase in the content of chlorine and sodium ions was observed at the water intake facility of the Azot branch, causing a shutdown of the plant. The causes of the phenomenon had to be identified. The putative causes were emergency discharges of concentrated waste from the sludge dump on the shore or contamination by the wastewater entering the Kama River below the intake facility due to backflow. These situations can be modeled taking into account the vertical heterogeneity of water masses based on the coupling of hydrodynamic models in one-, two-, and three-dimensional formulation. As a result, it was shown that the only cause of the emergency could be water intake from the Kama River bottom flow.

Key words: storage reservoirs; water supply stability; density stratification; modeling.

Введение

Проблема, актуализировавшая выполнение представленной работы, связана с увеличением содержания хлоридов 7–8 июля 2020 г. в воде реки, откуда осуществляет забор воды для производственных нужд филиал «Азот» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в городе Березники. Концентрация хлоридов возросла до 850 мг/л. Так как технологические процессы на предприятии весьма чувствительны к содержанию хлоридов, произошла внеплановая остановка производства. Это резкое повышение содержания хлоридов было однократным и локальным. Оно не привело к негативным последствиям в Камском водохранилище, в том числе к гибели рыбы и растительности. Общая обзорная схема рассматриваемого района представлена на рис. 1.

Проведенное Западно-Уральским межрегиональным управлением Росприроднадзора обследование определило перечень местных предприятий, в результате деятельности которых образуются сточные воды. Предстояло выявить наиболее вероятную причину резкого увеличения содержания хлоридов в речной воде из названных возможных:

- поступление из устья притока р. Камы – реки Толыч,
- сброс сточных вод в р. Каму (Камское водохранилище) от станции ООО «Сток» за счет обратных течений от Камской ГЭС, а также ветрового дрейфа.

Характерной особенностью гидрохимического режима этого участка р. Камы (Камского водохранилища) является сильное техногенное воздействие в пределах Соликамско-Березниковского промузла, причем техногенная нагрузка формируется в доминирующей степени не за счет точечных, декларируемых источников загрязнения, а вследствие разгрузки недекларируемых рассредоточенных, называемых в литературе диффузными [Диффузное..., 2020]. Это сток с поверхности водосбора, промышленных площадок, грунтовых вод, протечек из шламоохранилищ и пр. Характерной особенностью этих источников является высокая минерализация и, соответственно, плотность поступающих от них стоков.

Гидрохимический режим р. Камы в районе г. Березники

Характерной специфической особенностью рассматриваемого участка Камского водохра-

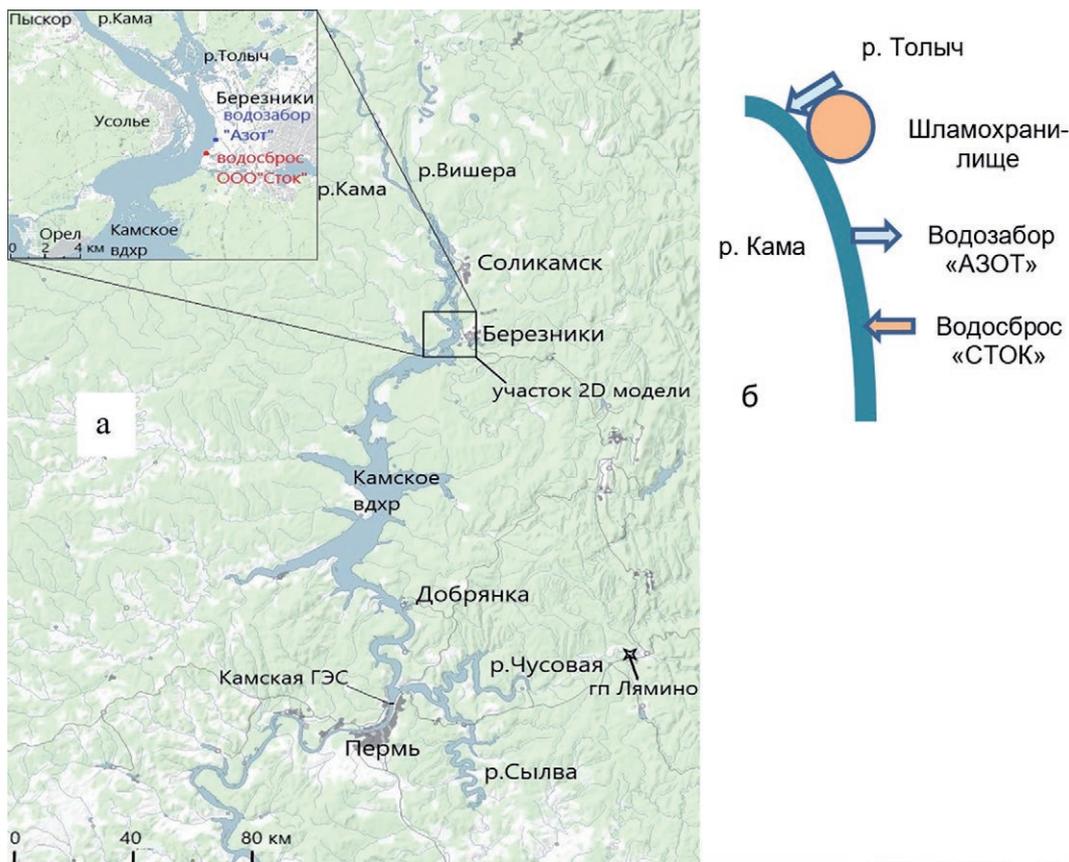


Рис. 1. Обзорная карта рассматриваемого участка Камского водохранилища (а); схема водопользования на участке р. Камы (б)
 Fig. 1. Overview map of the Kama reservoir section under consideration (a); water use scheme for the Kama River section (b)

нилища в районе г. Березники является формирование в период летней межени в придонной области значительного слоя воды толщиной ~ 3–5 м с повышенной минерализацией.

Характерной особенностью р. Камы (Камского водохранилища) в районе Соликамско-Березниковского промузла являются фильтрационные разгрузки высокоминерализованных рассолов с минерализацией, превышающей 100 г/л. «Тяжелые» рассолы из-за подавления вертикальных турбулентных пульсаций могут накапливаться в районе фильтрационных разгрузок в донном слое реки.

Впервые это явление для Камы было описано еще в 1959 г. Г. И. Куликовым [1959]. Граница раздела водных масс с различной минерализацией четко выражена. В поверхностном слое минерализация воды составляет 0,3–0,5 г/л, а в придонной области до 15 г/л.

Эти данные подтверждены полевыми исследованиями в июле 2020 г. Измерялась удельная электропроводность воды, имеющая устойчивую связь с минерализацией воды [Возняк

и др., 2019]. На рис. 2 представлены графики изменения удельной электропроводности воды на разных вертикалях, расположенных в 50–100 м от левого берега Камского водохранилища, от автодорожного моста Березники-Усолье до водосброса станции перекачки ООО «Сток» (далее по тексту – водосброс ООО «Сток»).

Аналогичные данные получены при полевых исследованиях в августе 2018 г. [Lepikhin et al., 2020]. Граница перехода находилась на глубине 8–10 м, как и в 2020 г.

Устойчивость границы раздела этих водных масс с различной минерализацией определяется числом Ричардсона Ri , которое характеризует отношение гравитационных сил (плавучести) к конвекции вследствие различия плотностей:

$$Ri = (g/\rho) \partial \rho / \partial z / (\partial u / \partial z)^2,$$

где g – гравитация; ρ – плотность, зависящая от глубины z ; u – характерная скорость потока. Критическое значение $Ri \sim 0,67$. Когда оно ве-

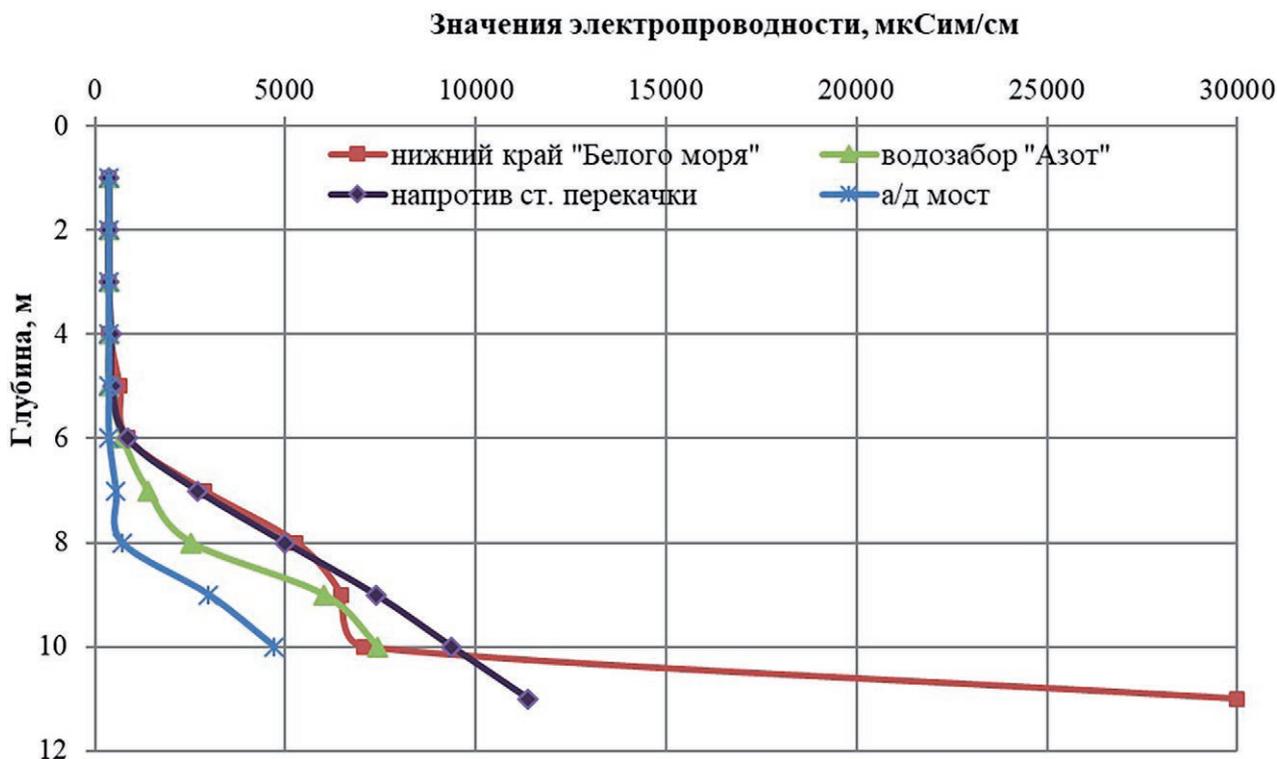


Рис. 2. Распределение удельной электропроводности по глубине вдоль левого берега р. Камы на отдельных вертикалях по результатам полевых исследований 14.07.2020

Fig. 2. Distribution of specific electrical conductivity in depth along the left bank of the Kama River on separate verticals according to the results of the field studies 14.07.2020

лико, турбулентное перемешивание в стратификации обычно подавляется. Для описанного течения $Ri \gg 1$ [см. Возняк и др., 2019; Lepikhin et al., 2020], что показывает устойчивость раздела слоев в р. Каме при данных условиях.

Анализ влияния Камской ГЭС

Характерной особенностью зафиксированного 7–8 июля 2020 г. нарушения устойчивости подачи воды требуемого качества является его относительная кратковременность ~ 2,5 суток.

На плотине Камской ГЭС в данный период наблюдались значительные колебания расхода воды, как и в любой другой период, в связи с требованием выработки электроэнергии.

Расход сброса в этот период изменялся от 300 до 3050 м³/сек (рис. 3). Эта неравномерность сброса воды через плотину ГЭС может вызвать формирование обратных течений из-за эффектов инерционности. В Камском водохранилище наблюдаются обратные течения, обусловленные особенностями работы Камской ГЭС. Их анализ дается в [Лепихин и др., 2020; Lyubimova et al., 2020a].

Обратные течения в водохранилище могут иметь также дрейфовую природу, обусловлен-

ную наличием достаточно интенсивного ветра одного направления. Для рассматриваемой задачи выноса «загрязнений» от водосброса ООО «Сток» к водозабору «Азота» наибольший интерес представляют ветры южного направления. Характерную скорость дрейфового течения можно оценить по соотношению Экмана [Богословский, 1980; Филатов, 1983].

Расчет дрейфовых течений на основе гидродинамических моделей в 2D-постановке, с использованием данных метеостанции г. Березники в период с 05.07 по 08.07.2020 г., показывает, что обратные течения не могут быть причиной наблюдаемой нештатной ситуации на рассматриваемом водозаборе.

Оценка влияния плотностной стратификации на процессы разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов может быть выполнена на численной модели в рамках 3D-подхода. Расчетная область длиной 4500 м включала в себя участок реки Камы, где расположены все предполагаемые источники поступления сильно минерализованных вод: устье р. Толыч – притока Камы, а также участок левого берега до створа сброса ООО «Сток» и русло реки на этом участке.

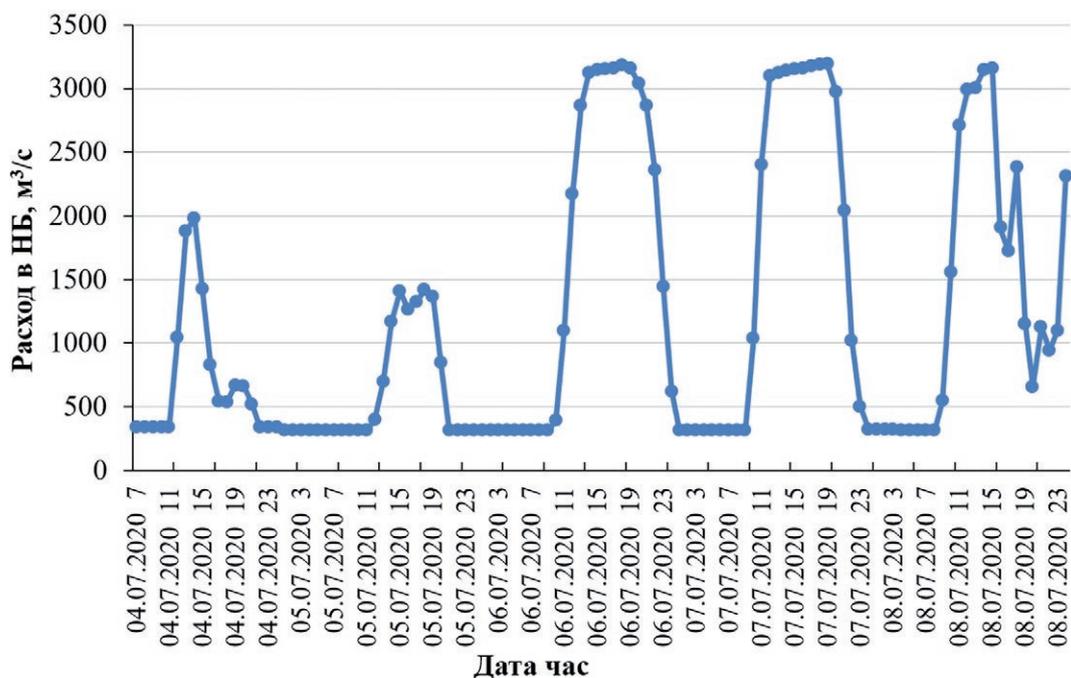


Рис. 3. Почасовая динамика расходов сбросов воды в нижний бьеф Камской ГЭС

Fig. 3. Hourly dynamics of water discharge costs in the lower reaches of the Kama HPP

Задача решалась в рамках нестационарного изотермического подхода с использованием стандартной $k - \epsilon$ модели турбулентности (k – турбулентная кинетическая энергия, ϵ – скорости ее диссипации) в 3D-постановке. Обоснованность использования этой модели представлена в работах [Возняк и др., 2019; Лепихин и др., 2020; Lepikhin et al., 2020].

На нижней границе расчетной области, имитирующей речное дно, ставились условия прилипания и отсутствия потока примеси (хлоридов). Верхняя граница области, соответствующая свободной поверхности жидкости, считалась недеформируемой; на ней ставились условия отсутствия нормальной компоненты скорости и касательных напряжений, а также условие отсутствия потока примеси. На боковых границах расчетной области выполнялись условия равенства нулю производной скорости по нормали и отсутствия потока примеси.

На входе расчетной области задавались постоянные по всему сечению скорость основного потока, имеющая одну ненулевую компоненту вдоль потока реки, и концентрация, равная фоновой концентрации примеси в реке. Трехмерное численное моделирование проводилось с помощью пакета прикладных программ ANSYS Fluent, основанного на реализации метода конечных объемов. Строилась неравномерная сетка при помощи пакета Gambit 2.4.6, входящего в вычислительный пакет

ANSYS Fluent, в соответствии с фактической морфометрией рассматриваемого участка. Учитывая значительные размеры расчетной области и крайнюю ограниченность гидрометрической сети, для построения гидродинамических моделей использовался комбинированный подход, основанный на сочетании и сопряжении гидродинамических моделей в 1D–2D–3D-постановке.

Для построения гидродинамической модели в одномерном приближении для Камского водохранилища от слияния рек Кама и Вишера до плотины Камской ГЭС протяженностью 265 км выбран специализированный гидрологический программный пакет HEC-RAS v. 5.0.7, разработанный Гидрологическим инженерным центром (HEC, США) [HEC-RAS..., 2016], который позволяет проводить гидродинамические расчеты для оценки обратных волн в водохранилище от попусков с ГЭС.

Для построения модели Камского водохранилища в одномерной постановке было построено 617 поперечных сечений по всей длине водохранилища (р. Камы) и основных притоков – рек Сылва и Чусовая – с шагом в 500 м. В качестве сценарного расчета для одномерной модели был проведен расчет с изменением расхода сброса от времени на Камской ГЭС в период с 3 по 8 июля 2020 года. Использовались почасовые расходы воды в нижний бьеф Камской ГЭС (рис. 3) и суточные уровни

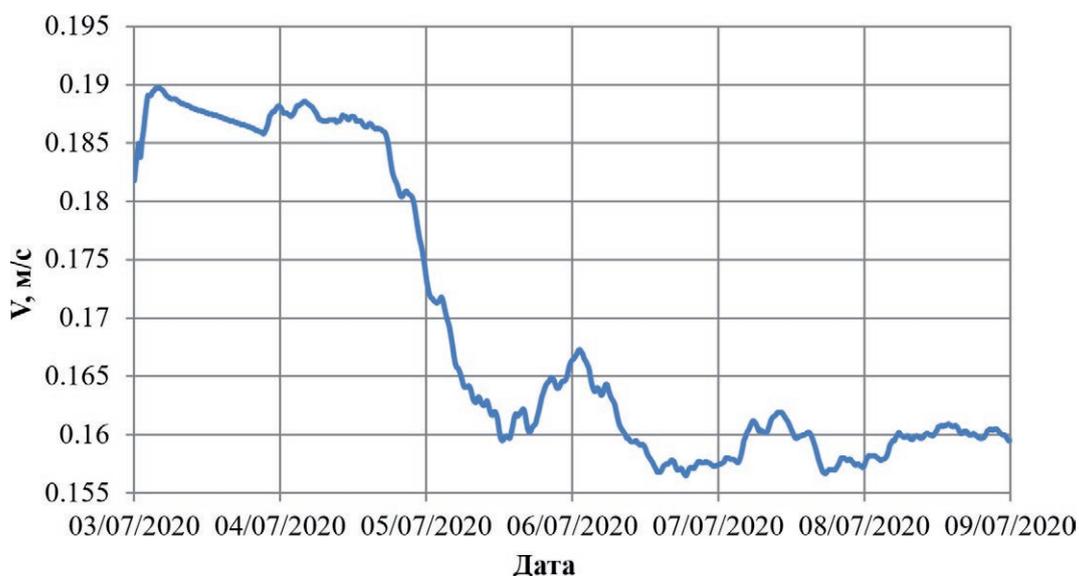


Рис. 4. Изменение скорости течения в р. Каме в районе г. Березники с 3 по 8 июля 2020 года по результатам расчета на одномерной модели

Fig. 4. Change in the flow velocity in the Kama River near Berezniki from 3 to 8 July, 2020 based on the results of the calculation on a one-dimensional model

воды в верхнем бьефе Камской ГЭС, а также суточные расходы воды в р. Чусовая (по г. п. пгт Лямино) и в р. Сылва (по г. п. с. Сылвенск).

Проведенным расчетом с натурными данными расходов и уровней воды получены графики изменения расхода воды, уровня воды и скорости течения в р. Каме в районе г. Березники. Как следует из полученных результатов, колебательные изменения расходов сброса в нижний бьеф Камской ГЭС в течение дня также приводят к колебаниям скоростей течения в районе г. Березники (рис. 4). Однако эти колебания скоростей течения не приводят к возникновению обратных течений на этом участке реки Камы и, следовательно, не могут быть причиной поступления загрязняющих веществ с нижележащих участков водохранилища в расположенные выше (рис. 4).

Моделирование в 2D- и 3D-постановке распространения загрязняющих веществ на участке р. Камы в районе г. Березники при гидрологических условиях 3–8 июля 2020 года

При создании гидродинамической модели в двумерной постановке на расчетной области построена прямоугольно-треугольная сетка, состоящая из 25743 элементов со средней длиной ребра элемента 50 метров. Размеры моделируемого объекта: длина 24 км, ширина от 400 до 5000 м.

Двумерная (в горизонтальной плоскости) модель для участка р. Камы от с. Пыскор до пос. Орёл протяженностью 24 км сделана с использованием специализированного гидрологического пакета SMS v.11.1 американской компании AQUAVEO LLC, разработанного по заказу и при участии Центра гидравлических исследований США. В ее основе лежат несколько модулей (RMA2, RMA4, ADH, FESWMS, TUFLOW и другие), которые позволяют решать различные задачи. Нами использованы модули RMA2, применявшийся для моделирования двумерного течения, и модуль RMA4, который использовался для моделирования распространения загрязнения.

На этом участке реки Камы была построена цифровая модель рельефа дна (ЦМР). Расчет основных гидродинамических характеристик и расчет распространения загрязнения потока проводится в два этапа. На первом этапе в модуле RMA2 выполняется расчет гидродинамических характеристик, в первую очередь распределения глубин и распределенных по вертикали скоростей потока. На втором этапе в модуле RMA4 с использованием рассчитанного на первом этапе распределения скоростей производился расчет распространения загрязнения.

Для проведения расчета распространения загрязняющих веществ выбраны два источника загрязнения на данном участке р. Камы:

- поступление ЗВ через устьевой залив р. Толыч, г. Березники, моделирующий диффуз-

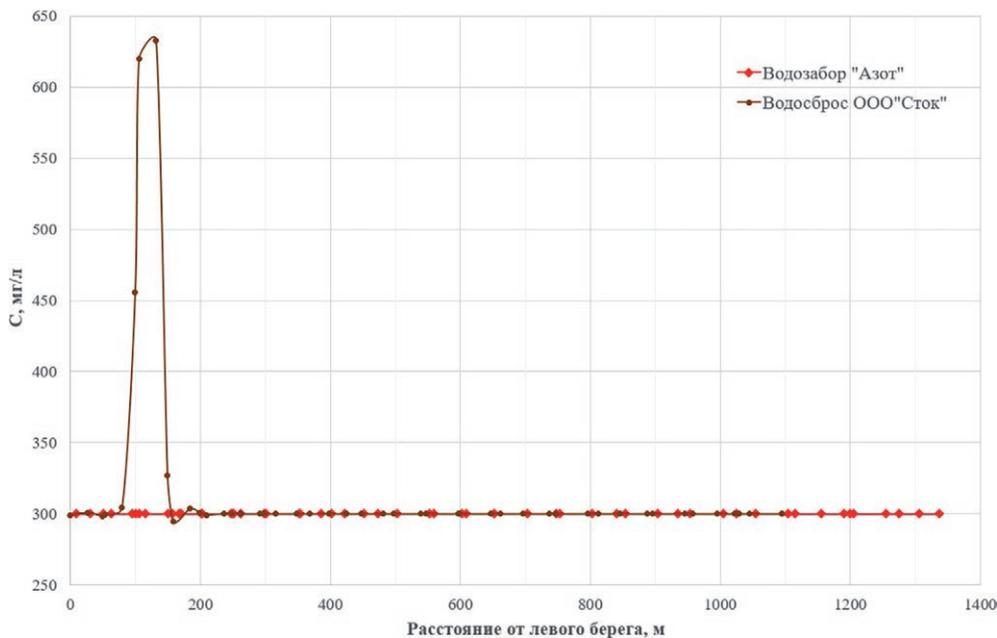


Рис. 5. График расчетной концентрации хлоридов в районе водозабора «Азот» и водосброса ООО «Сток» при их поступлении через водосброс ООО «Сток» в расчетное время 5 дней 14 часов, что соответствует дате 08.07.2020 и времени 14.00

Fig. 5. The schedule of the calculated concentration of chlorides in the area of the water intake 'Azot' and in the area of the spillway of LLC 'Stok' when they enter through the spillway of LLC 'Stok' at the estimated time of 5 days 14 hours, which corresponds to the date 08.07.2020 and the time 14.00

ное загрязнение от шламохранилища «Белое море»;

- поступление ЗВ через водосброс ООО «Сток», г. Березники, благодаря возвратному течению.

Для расчета использованы следующие расходы и концентрации загрязняющих веществ:

- на всем участке моделирования р. Камы за фоновое значение принята концентрация 300 мг/л;
- при поступлении ЗВ через устьевой залив р. Толыч принят постоянный расход поступающих ЗВ 1,61 м³/с концентрацией 100 г/л, что соответствует интенсивности поступления ЗВ 161 кг/с (модель фильтрационного загрязнения);
- при поступлении ЗВ через водосброс ООО «Сток» рассмотрен вариант реальной работы с расходом сброса 19000 м³/час (или 5,28 м³/с). Сброс осуществляется по 2 часа каждый день, для определенности принято время работы с 12 до 14 часов дня, с концентрацией – 10 г/л.

Проведенные вычислительные эксперименты (рис. 5) показали, что изменения уровней воды в результате неравномерности работы Камской ГЭС, а также наблюдаемые в этот период ветры южного направления недостаточны

для формирования нештатной ситуации продолжительностью 2,5 суток вследствие «заброса» загрязненных сточных вод от расположенной ниже по течению станции перекачки ООО «Сток». Соответственно, обратные течения не могут рассматриваться как фактор формирования наблюдаемой нештатной ситуации.

Для залива р. Толыч как источника загрязнения р. Камы в верхней части г. Березники в районе рассматриваемого водозабора ОАО «Азот» возможно повышение минерализации воды до 0,8 г/л (рис. 6). Однако эти данные требуют корректировки, так как получены в рамках 2D-модели, которая не учитывает наличие двухслойного течения в р. Каме.

Задача в 3D-постановке решалась с помощью пакета вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent с использованием $k - \epsilon$ модели, описывающей турбулентные пульсации в рамках нестационарного изотермического подхода. Ранее этот пакет успешно применялся для описания течения высокоминерализованных рассолов в поверхностных водных объектах [Лепихин и др., 2012; Lyubimova et al., 2020b]. В качестве возможного источника загрязнения р. Камы (Камского водохранилища) рассматривался залив р. Толыч. При этом фоновая минерализация воды в р. Каме принималась равномерной

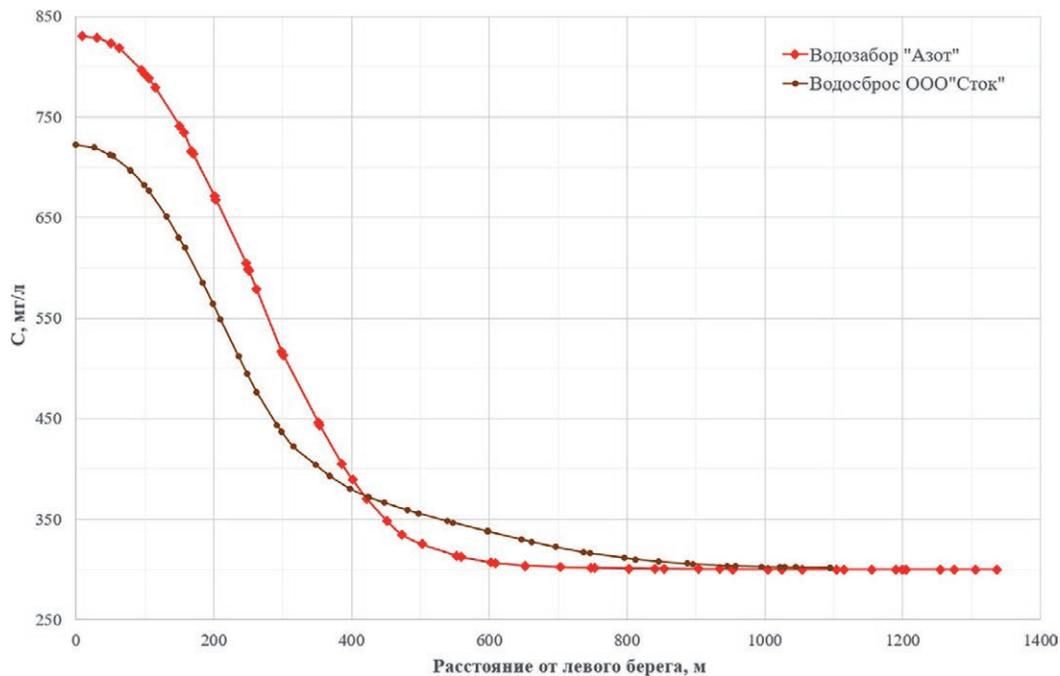


Рис. 6. Профили концентрации хлоридов в районе водозабора «Азот» и водосброса ООО «Сток» при их поступлении через залив р. Толыч в расчетное время 5 дней 14 часов, что соответствует дате 08.07.2020 и времени 14.00

Fig. 6. Profiles of the chlorides concentration in the area of the water intake 'Azot' and in the area of the spillway of LLC 'Stok' when they enter through the bay of the Tolych River at the estimated time of 5 days 14 hours, which corresponds to the date 08.07.2020 and the time 14.00

по всему сечению потока и равной 0,2 г/л. Минерализация воды по всему заливу р. Толыч принималась одинаковой и равной 100 г/л.

Скорости во входных сечениях на р. Каме и при слиянии в заливе реки Толыч и реки Камы задавались в виде профилей скорости, полученных в двумерных расчетах.

На рис. 7 показаны распределения минерализации по глубине для разных вертикалей у водозабора «Азот» на расстоянии 50, 100, 150 метров от берега.

Из представленных расчетом данных видно, что концентрация 800 мг/л достигается только на глубине более 6 м. Концентрация на поверхности – менее 450 мг/л.

Основной результат выполненных вычислительных экспериментов, как и представленных в [Lerikhin et al., 2020] данных, состоит в том, что вне зависимости от расположения источника поступления в водный объект высокоминерализованных рассолов происходит вертикальная стратификация водных масс по плотности. При этом в придонной области формируется устойчивый слой воды с высокой минерализацией. Соответственно, повышенное содержание хлоридов при заборе воды филиалом «Азот» может быть объяснено только поступлением воды не из поверхностных, а из придонных горизонтов.

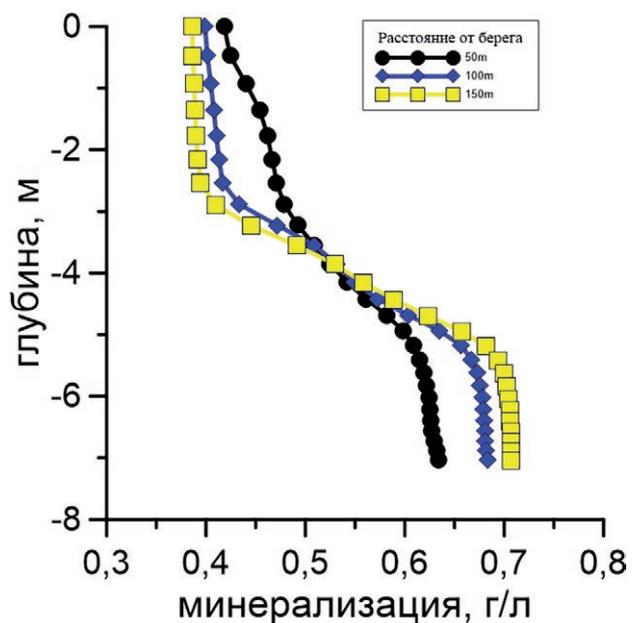


Рис. 7. Распределение минерализации по глубине для разных контрольных вертикалей у водозабора «Азот» на расстоянии 50, 100, 150 метров от берега

Fig. 7. Distribution of mineralization by depth for different control verticals at the water intake 'Azot' at distances of 50, 100, 150 meters from the shore

Выводы

Использование комплексного 1D–2D–3D-моделирования дает ответы для решения вопроса о возможных источниках повышенной минерализации воды в водозаборе филиала «Азот».

1. При наблюдаемом гидрологическом режиме р. Камы и работе Камской ГЭС, а также ветровом режиме не могут фиксироваться обратные течения и, соответственно, не могут поступать загрязняющие вещества, сбрасываемые через водосброс ООО «Сток» в р. Каму (Камское водохранилище), в водозабор «Азота».

2. В качестве возможного источника загрязнения р. Камы в верхней части г. Березники был принят аварийный сброс в устьевой залив р. Толыч интенсивностью 161 кг/с (по общей минерализации), моделирующий фильтрационные разгрузки из шламоохранилища «Белое море». Проведенные расчеты на математической модели в трехмерной постановке показали, что на рассмотренном участке р. Камы и источнике загрязнения в устье р. Толыч может наблюдаться повышенная минерализация воды в районе рассматриваемого водозабора менее 1 г/л. Распределение минерализации воды характеризуется значительной вертикальной плотностной стратификацией и высокие концентрации наблюдаются в придонном слое, а в поверхностном горизонте – не более 0,8 г/л. Граница раздела водных масс находится на глубине ~ 6 м.

Обосновано, что даже существенная аварийная ситуация не могла привести к забору воды ненормативного качества при условии, что забор производится из поверхностных горизонтов.

Подход, основанный на сопряженном использовании гидродинамических моделей в 1D–2D–3D-постановке, позволяет объективно подойти к анализу сложной ситуации, связанной с устойчивостью систем водообеспечения крупных промышленных комплексов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания АААА-А18-118022090106-2, при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-41-590013) и гранта РНФ (грант № 17-77-20093).

References

Bogoslovskii B. B. Volny, techeniya i vodnye massy vodoemov: Konspekt lektzii LGMI [Waves, currents and water masses of reservoirs: A compendium of LGMI lectures]. Leningrad: LPI, 1980. 56 p.

Литература

Богословский Б. Б. Волны, течения и водные массы водоемов: Конспект лекций ЛГМИ. Л.: ЛПИ, 1980. 56 с.

Возняк А. А., Лепихин А. П., Ляхин Ю. С., Богомолов А. В. Масштабы и структура диффузного загрязнения Камского водохранилища // Труды VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пермь, 30 мая – 2 июня 2019 г.). Том II. Качество воды. Геоэкология. Пермь, 2019. С. 34–39.

Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / Коллект. монография под рук. В. И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020. 512 с.

Куликов Г. И. Влияние сброса химической промышленности на минерализацию воды Камского водохранилища в районе г. Березники // Матер. всеобщ. совещ. по вопросам эксплуатации Камского водохранилища. Вып. 2. Пермь, 1959. С. 1–13.

Лепихин А. П., Богомолов А. В., Тиунов А. А. Особенности течений в верхних бьефах крупных ГЭС, связанных с неравномерностью пропуска через них воды // Горное эхо. 2020. № 1(78). С. 12–15. doi: 10.7242/echo.2020.1.3

Лепихин А. П., Любимова Т. П., Паршакова Я. Н., Тиунов А. А. К проблеме утилизации избыточных рассолов предприятиями калийной промышленности в водные объекты // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 2. С. 185–193.

Филатов Н. Н. Динамика озер. Л.: Гидрометеоиздат, 1983.

HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69) / Gary W. Brunner, Version 5.0, February 2016. P. 547.

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 Resources. 2020. Vol. 47, no. 5. P. 744–750. doi: 10.31857/S0321059620050120

Lyubimova T., Parshakova Ya., Lepikhin A., Lyakhin Yu., Tiunov A. The effect of unsteady water discharge through dams of hydroelectric power plants on hydrodynamic regimes of the upper pools of waterworks // Water. 2020a. Vol. 12: 1336. doi: 10.3390/w12051336

Lyubimova T. P., Lepikhin A. P., Parshakova Ya. N. Numerical simulation of highly saline wastewater discharge into water objects to improve discharge devices // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2020b. Vol. 61, no. 7. P. 203–209.

Поступила в редакцию 23.03.2021

Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov: problemy i resheniya [Diffuse water pollution: problems and solutions]. Collective monograph under the direction of V. I. Danilov-Danilyan. Moscow: RAN, 2020. 512 p.

Filatov N. N. Dinamika ozer [Dynamics of lakes]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983.

Kulikov G. I. Vliyaniye sbrosa khimicheskoi promyshlennosti na mineralizatsiyu vody Kamskogo vodokhranilishcha v raione g. Berezniki [The influence of the discharge of the chemical industry on the mineralization of the water of the Kama reservoir in the area of the city of Berezniki]. Mater. vsesoyuzn. soveshch. po voprosam ekspluatatsii Kamskogo vodokhranilishcha [Proceed. of the All-Union Meeting on the operation of the Kama reservoir]. Iss. 2. Perm', 1959. P. 1–13.

Lepikhin A. P., Bogomolov A. V., Tiunov A. A. Oso-bennosti techenii v verkhnikh b'efakh krupnykh GES, svyazannykh s neravnomernost'yu propuska cherez nikh vody [Features of currents in the upper water pool of large hydroelectric power stations associated with the unevenness of water flow through them]. Gornoe ekho [Mountain Echo]. 2020. No. 1(78). P. 12–15. doi: 10.7242/echo.2020.1.3

Lepikhin A. P., Lyubimova T. P., Parshakova Ya. N., Tiunov A. A. K probleme utilizatsii izbytochnykh ras-solov predpriyatiyami kaliinoi promyshlennosti v vodnye ob'ekty [To the problem of recycling excess brines by potash industry enterprises into water bodies]. Fiziko-tekhn. probl. razrabotki poleznykh iskopaemykh [Physical and Tech. Probl. of Mineral Development]. 2012. No. 2. P. 185–193.

Voznyak A. A., Lepikhin A. P., Lyakhin Yu. S., Bogomolov A. V. Masshtaby i struktura diffuznogo zagryazneniya Kamskogo vodokhranilishcha [The scale and struc-

ture of diffuse pollution of the Kama reservoir]. Trudy VII Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem (g. Perm', 30 maya – 2 iyunya 2019 g.). Tom II. Kachestvo vody. Geokol. [Proceed. VII All-Russ. sci. pract. conf. with int. part. (Perm, May 30 – June 2, 2019)]. Perm', 2019. P. 34–39.

HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69). Gary W. Brunner, Version 5.0, February 2016. 547 p.

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 Resources. 2020. Vol. 47, no. 5. P. 744–750. doi: 10.31857/S0321059620050120

Lyubimova T., Parshakova Ya., Lepikhin A., Lyakhin Yu., Tiunov A. The effect of unsteady water discharge through dams of hydroelectric power plants on hydrodynamic regimes of the upper pools of waterworks. Water. 2020a. Vol. 12: 1336. doi: 10.3390/w12051336

Lyubimova T. P., Lepikhin A. P., Parshakova Ya. N. Numerical simulation of highly saline wastewater discharge into water objects to improve discharge devices. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2020b. Vol. 61, no. 7. P. 203–209.

Received March 23, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лепихин Анатолий Павлович

заведующий лабораторией, д. г. н., проф.
Горный институт Уральского отделения РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН
ул. Сибирская, 78А, Пермь, Россия, 614007
эл. почта: lepihin49@mail.ru

Веницианов Евгений Викторович

заведующий лабораторией, д. ф.-м. н., проф.
Институт водных проблем РАН
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333
эл. почта: eugeniy.venitsianov@gmail.com

Любимова Татьяна Петровна

заведующая лабораторией, д. ф.-м. н., проф.
Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН
ул. Академика Королева, 1, Пермь, Россия, 614013
эл. почта: lyubimovat@mail.ru

Тиунов Алексей Александрович

ведущий инженер
Горный институт Уральского отделения РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН
ул. Сибирская, 78А, Пермь, Россия, 614007
эл. почта: alexey.tiunov@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Lepikhin, Anatoly

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
78A Sibirskaya St., 78A, 614007 Perm, Russia
e-mail: lepihin49@mail.ru

Venitsianov, Eugeny

Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences
3 Gubkina St., 119333 Moscow, Russia
e-mail: eugeniy.venitsianov@gmail.com

Lyubimova, Tatyana

Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (ICMM UB RAS)
1 Akademika Koroleva St., 614013 Perm, Russia
e-mail: lyubimovat@mail.ru

Tiunov, Aleksey

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
78A Sibirskaya St., 78A, 614007 Perm, Russia
e-mail: alexey.tiunov@gmail.com

Паршакова Янина Николаевна

научный сотрудник, к. ф. -м. н.
Институт механики сплошных сред Уральского
отделения РАН – филиал Пермского федерального
исследовательского центра УрО РАН
ул. Академика Королева, 1, Пермь, Россия, 614013
эл. почта: gadiyatova@mail.ru

Ляхин Юрий Сергеевич

научный сотрудник, к. т. н.
Горный институт Уральского отделения РАН –
филиал Пермского федерального исследовательского
центра УрО РАН
ул. Сибирская, 78А, Пермь, Россия, 614007
эл. почта: ljahin85@mail.ru

Богомолов Андрей Владимирович

научный сотрудник, к. т. н.
Горный институт Уральского отделения РАН –
филиал Пермского федерального исследовательского
центра УрО РАН
ул. Сибирская, 78А, Пермь, Россия, 614007
эл. почта: whitewing85@mail.ru

Parshakova, Yanina

Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences (ICMM UB RAS)
1 Akademika Koroleva St., 614013 Perm, Russia
e-mail: gadiyatova@mail.ru

Lyakhin, Yury

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy
of Sciences
78A Sibirskaya St., 78A, 614007 Perm, Russia
e-mail: ljahin85@mail.ru

Bogomolov, Andrey

Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy
of Sciences
78A Sibirskaya St., 78A, 614007 Perm, Russia
e-mail: whitewing85@mail.ru