

вносят недекларируемые, рассредоточенные источники загрязнения, связанные с фильтрационными разгрузками из шламохранилища.

В районе г. Березники фильтрационные разгрузки из шламохранилища, расположенного в северной части города непосредственно на левом берегу р. Камы (Камского водохранилища), формируют в придонной области очень существенную зону загрязнения. По материалам полевых исследований, выполненных в августе, интенсивность данного источника загрязнения составляет  $q \sim 157$  кг/сек при линейных размерах  $\sim 1000$  м.

Разработанная гидродинамическая модель в 3D постановке, в негидростатическом приближении, позволяет достаточно хорошо воспроизводить особенности распределения полей минерализации воды, формируемых вследствие фильтрационных разгрузок из шламохранилища «Белое море».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лепихин А.П., Мирошниченко С.А. Техногенное воздействие Соликамско-Березниковского промузла на поверхностные водные объекты / А.П. Лепихин, С.А. Мирошниченко // Горн. журн. – 2008. – № 10. – С. 92-96.
2. Лепихин А.П., Возняк А.А. Разработка региональных ПДК: необходимость, методика, пример / А.А. Возняк, А.П. Лепихин // Географич. вестн. – 2018. – № 2 (45). – С. 103-115. DOI:10.17072/2079-7877-2018-2-103-115.
3. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Yu., Lyakhin Y., Tiunov A. The modeling of the formation of technogenic thermal pollution zones in large reservoirs // International journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – V. 126. – November. – P. 342-352. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.017.
4. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А. Численное моделирование разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов в турбулентных потоках // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – № 4. – С. 68-79.
5. Лепихин А.П., Богомолов А.В. Особенности отведения избыточных рассолов предприятий калийной промышленности в поверхностные водные объекты // Горн. журн. – 2018. – № 6. – С. 21-24. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.04.

УДК 556.5

DOI: 10.7242/echo.2019.1.7

## АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ НА р. КАМА, ОБУСЛОВИВШЕЙ ВЫНОС СУДОВ В г. ПЕРМИ С МЕСТ ИХ ЗИМНЕГО ОТСТОЯ

А.А. ТИУНОВ

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Аварийные ситуации на водных объектах, как правило, связаны с резкими изменениями гидродинамических характеристик на данном водном объекте и с человеческим фактором. Так 22 января 2019 года в г. Перми произошла серьезная аварийная ситуация, в результате которой несколько судов, находившихся в зимнем отстое в районе порта Кама г. Пермь, были сорваны с мест стоянки и вынесены на фарватер р. Кама. В ходе проведенного гидродинамического моделирования было показано, что аварийная ситуация была обусловлена совокупностью факторов: резкое изменение гидрологического режима р. Кама в данном районе и погодных условий, сильные морозы и, как следствие, образование большого количества льда в районе отстоя судов.

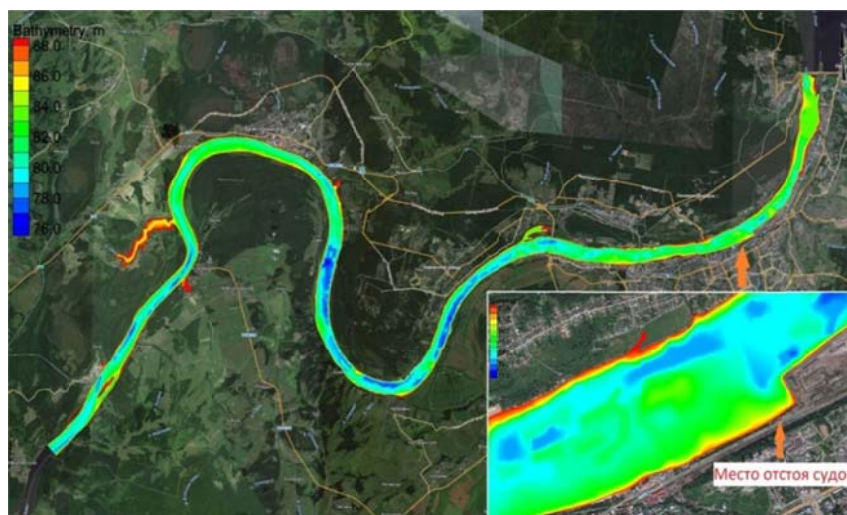
**Ключевые слова:** гидродинамическая модель, гидрологический режим, аварийная ситуация на р. Кама.

Серьезные аварийные ситуации на водных объектах, как правило, обуславливаются значительными изменениями их гидрологического режима.

Двадцать второго января 2019 года в г. Перми произошла серьезная аварийная ситуация, в результате которой несколько судов, находившихся в зимнем отстое в районе порта Кама г. Пермь (рисунок 1), были сорваны с мест стоянки и вынесены на фарватер

р. Кама. Потребовалось приложить значительные усилия целого ряда ведомств г. Перми, чтобы вывести вынесенные суда к месту их новой безопасной зимней стоянки.

Для анализа наблюдаемой ситуации, выявления возможных причин аварии выноса судов, была проведена серия модельных расчетов с использованием гидродинамической модели данного участка р. Камы в 2D-постановке. Данная модель входит в пакет программ, разработанных для решения актуальных водохозяйственных вопросов на р. Кама в нижнем бьефе Камской ГЭС (гг. Краснокамск и Пермь), рис. 1.



**Рис. 1.** Морфометрия моделируемого участка р. Кама, отдельно показан район порта Кама

Модель рассматриваемого участка р. Камы была разработана на основе лицензированного программного продукта SMS v.11.1, рисунок 1. Описание его отдельных модулей дается в [1], SMS v.11.1 неоднократно нами использовался для решения самых актуальных водохозяйственных задач, таких как: оценка зон затопления, скоростного и уровня режимов при добыче нерудных строительных материалов (в реках Вятка [2], Сылва [3], в водохранилищах Воткинское и Нижнекамское); распространение загрязнения (в реках Вятка [4], Амур, в водохранилищах Клязьминское, Учинское, Камское [5], Воткинское, Магнитогорское); распространение теплового поля (Исетское, Магнитогорское и Камское водохранилища [6]); изменение гидродинамики потока (слияние рек Чусовая и Сылва [7]); по защите берегов (р. Дон в районе г. Павловска [8]); транспорт взвешенных наносов (р. Кама - г. Пермь [9]).

Исходные гидравлические, гидрологические характеристики по р. Кама за 21-23 января 2019 г. были предоставлены Филиалом ПАО «РусГидро» – «Камская ГЭС» и Пермским ЦГМС – филиал ФГБУ «Уральское УГМС», рисунок 2. Как следует из рисунка 2, 21-23 января 2019 г. наблюдались значительные колебания сброс воды через Камскую ГЭС.

Определенную сложность при калибровке модели, связанной с подбором эффективных коэффициентов гидравлического сопротивления, представляло отсутствие непрерывной записи уровня воды по озерным гидропостам (ОГП) Воткинское вдхр. – гг. Краснокамск и Пермь. Если уровень воды и расход сброса на Камской ГЭС эффективно фиксируется и предоставляется с шагом 1 час, то на постах гг. Краснокамск и Пермь измерения уровня воды производятся 2 раза в сутки, соответственно, с шагом 12 часов. Если данная частота замеров может быть на реках, за исключением периода прохождения волны паводка, то для нижнего бьефа ГЭС, когда гидравлические характеристики водотока полностью определяются режимом сброса через плотину, такая частота наблюдений представляется совершенно недостаточной.



**Рис. 2.** Наблюдаемые гидродинамические характеристики на р. Кама в нижнем бьефе Камской ГЭС за 21 – 23 января 2019 г.

Низкая частота замеров уровня воды на гидропосту р. Кама – г. Пермь вносит дополнительную погрешность в калибровку модели, оценку эффективности интегральной гидравлической шероховатости на рассматриваемом участке водотока.

В результате модельных расчетов были рассчитаны изменения уровня воды и поля распределения скоростей за 21-23 января 2019 г.

На рисунке 3 изображен график сравнения расчетных и наблюдаемых значений уровня воды на р. Кама в нижнем бьефе Камской ГЭС за 21 – 23 января 2019 г.

Из рисунка 3 видно, что расчетные уровни воды хорошо ложатся в диапазон изменения и имеют схожую структуру колебаний, как и наблюдаемые уровни воды в нижнем бьефе Камской ГЭС и на ОГП Воткинское вдхр. – г. Пермь.

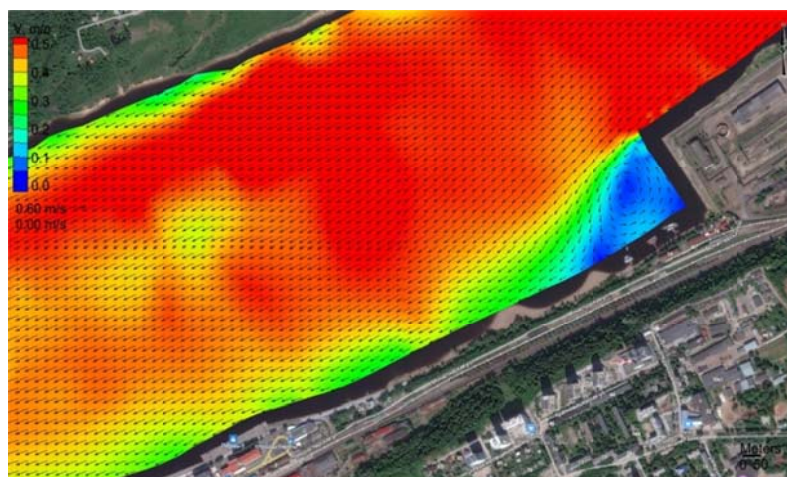
На рисунке 4 показано расчетное поле скоростей в районе порта Кама в момент времени отрыва судов, 19:30 22.01.2019 года. Из рисунка 4 видно, что в момент времени отрыва судов наблюдаются сильные обратные течения в районе порта Кама с максимальной скоростью вдоль берега до 0,25 м/с. В свою очередь, как видно на рисунке 3, в данный момент времени также наблюдается значительный подъем уровня воды.

Также была проведена оценка массы льда в области отстоя судов,  $M = S \cdot h \cdot \rho$ , где  $S$  – площадь льда (примерная зона отстоя  $300 \text{ м} \cdot 250 \text{ м} = 75000 \text{ м}^2$ ),  $h$  – толщина льда (возьмем по минимуму 15 см, для января при морозах  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и  $\rho$  – плотность льда (примерно  $920 \text{ кг/м}^3$  при  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), в итоге  $M$  – масса льда в области отстоя судов, примерно равна 10350 тон.



**Рис. 3.** График сравнения расчетных и наблюдаемых значений уровня воды на р. Кама в нижнем бьефе Камской ГЭС за 21 – 23 января 2019 г.

Проведённый анализ гидродинамической ситуации на р. Кама от 22 января 2019 г. при помощи моделирования показал, что вынос судов обусловлен резким подъемом воды с существенным увеличением скоростей течения, особенно вдоль берега, и большим объемом льда в районе отстоя судов. Это и привело к отрыву крепи судов и их уносу по р. Кама в сторону автодорожного моста, тем самым создав аварийную ситуацию, возможность повреждения опор автодорожного моста через р. Кама при столкновении с дрейфующими судами. Следует отметить, что после отрыва судов и их выноса на фарватер р. Кама сброс воды с Камской ГЭС был снижен, что привело к тому, что суда прибило к левому берегу, где они и оставались, пока их не эвакуировали к месту новой стоянки.



**Рис. 4.** Карта-схема распределения поля скоростей на р. Кама в районе порт Кама, в момент времени 19:30, 22.01.2019 г.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. RMA2 WES Version 4.5: Users Guide To [electronic resource] / US Army, Engineer Research and Development Center, Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory. – Режим доступа: <https://www.aquaveo.com/software/sms-learning-tutorials>. – 27.09.2011.
2. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Богомолов А.В., Перепелица Д.И., Паршакова Я.Н. Гидродинамическое моделирование реки Вятки в среднем течении: постановка задачи, результаты расчетов // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление. – 2013. – № 3. – С. 16-32.
3. Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Тиунов А.А. Анализ и обоснование возможных схем защиты г. Кунгура от наводнений // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. – 2007. – № 2. – С.80-94.
4. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Tiunov A. The risk of river pollution due to washout from contaminated floodplain water bodies during periods of high magnitude floods. // Journal of Hydrology. – 2016. – V. 534, march 01. – P. 579-589.
5. Богомолов А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н. Особенности организации рассеивающих водовыпусков для отведения избыточных рассолов в водные объекты // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2016. – № 2. – С. 72-86.
6. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Lyakhin Yu., Tiunov A. The modelling of the formation of technogenic thermal pollution zones in large reservoirs // International journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – V. 126. – November. – P. 342-352. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.017.
7. Lyubimova T., Lepikhin A., Kononov V., Parshakova Ya., Tiunov A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // Journal of Gydrology. – 2014. – V. 508. – P. 328-342. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.041.
8. Богомолов А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А. Использование численных гидродинамических моделей для оценки эффективности проектных решений по защите берегов (на примере реки Дон в районе города Павловска) // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 1. – С. 50-57.
9. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Лепешкин С.А., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н., Перепелица Д.И. К проблеме оценки последствий крупномасштабной добычи нерудных строительных материалов на поверхностные водные объекты // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 3. – С. 108-119.