

References

- Mustel I. P., Shlendova T. K. Changing of hydrogeological conditions under emergency deformation of the undermined rock mass (with an example of Berezniiki-1 mine). *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 4. pp. 32–39. DOI: 10.17580/gzh.2016.04.06
- Baryakh A. A., Samodelkina N. A. Geomechanical estimation of deformation intensity above the flooded potash mine. *Journal of Mining Sciences*. 2017. Vol. 53, No. 4. pp. 630–642.
- Ponomarenko T. Ecological, economic and social consequences of emergencies on potash mines. *Management Systems in Production Engineering*. 2012. No. 2(6). pp. 28–31.
- Owoseni J. O., Tamarautobou E. U., Asiwaju-Bello Y. A. Application of Sequential Analysis and Geographic Information Systems for Hydrochemical Evolution Survey, Shagari Environ, Southwestern Nigeria. *American International Journal of Contemporary Research*. 2013. Vol. 3, No. 3. pp. 38–48.
- Courtney M. G. R. Determining the number of factors to retain in EFA: Using the SPSS R-Menu v2.0 to make more judicious estimations. *Practical Assessment, Research and Evaluation*. 2013. Vol. 18(8).
- Hisafumi Asaue, Naoyuki Tadakumsa, Katsuaki Koike. Application of GIS to Hydrogeological Structure Modeling Aimed at Conservation of Groundwater Resources. *Geoinformatics*. 2014. Vol. 25, Iss. 3. pp. 159–168.
- Belkhir L., Narany T. S. Using multivariate statistical analysis, geostatistical techniques and structural equation modeling to identify spatial variability of groundwater quality. *Water Resources Management*. 2015. Vol. 29, Iss. 6. pp. 2073–2089.
- Kologrivko A. A. Decrease in geoeological consequences by underground mining of potash fields. *Herald of Polotsk State University. Series F: Civil Engineering. Applied*. 2014. No. 16. pp. 101–110.
- Zubov V. P., Smychnik A. D. The concept of reducing the risks of potash mines flooding caused by groundwater inrush into excavations. *Journal of Mining Institute*. 2015. Vol. 215. pp. 29–37.
- Samodelkina N. A. Prediction of negative consequences of Berezniiki Mine-1 flooding. *Strategies and Processes of Georesources Development : Collection of Scientific Papers*. Perm : GI UrO RAN. 2014. Iss. 12. pp. 84–87.
- Devyatkov S. Yu. Determining conditions of sinkholes on ground surface. *Strategies and Processes of Georesources Development : Collection of Scientific Papers*. Perm : GI UrO RAN. 2014. Iss. 12. pp. 96–98.
- Baryakh A. A., Devyatkov S. Yu., Samodelkina N. A. Theoretical explanation of conditions for sinkholes after emergency flooding of potash mines. *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52, No. 1. pp. 36–45.
- Baryakh A. A., Samodelkina N. A. Rheological analysis of geomechanical processes. *Journal of Mining Science*. 2005. Vol. 41, No. 6. pp. 522–530.
- Amusin B. Z., Linkov A. M. Applying variable modules in solving a class of problems of linearly hereditary creep. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela*. 1974. No. 6. pp. 162–166.
- Konosavsky P. K., Potapov A. A., Makashov S. E. Predictive estimate of carnallite dissolution in pillars in Berezniiki Mine-1 after emergency flooding (Upper Kama Potash Deposit). Modeling in solution of geoeological problems: Sergeev's Lectures. Moscow : GEOS. 2009, Iss. 11. pp. 357–361.
- Khodkov A. E. Test data on in situ leaching of carnallite. *Transactions of the All-Union Research Institute of Mineral-Salt Production*. 1953. Iss. 28. pp. 38–49.

УДК 627:622.363

ОСОБЕННОСТИ ОТВЕДЕНИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ РАССОЛОВ ПРЕДПРИЯТИЙ КАЛИЙНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

А. П. ЛЕПИХИН, заведующий лабораторией, проф., д-р геогр. наук, lepihin49@mail.ru

А. В. БОГОМОЛОВ, научный сотрудник, канд. техн. наук

Горный институт УрО РАН – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия

Обоснованы условия регулируемого сброса промышленных солевых стоков в Камское водохранилище.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение, калийные соли, избыточные рассолы, гидродинамическое моделирование, отведение сточных вод, обогащение калийной руды, р. Кама (Камское водохранилище).

DOI: 10.17580/gzh.2018.06.04

Введение

В Пермском крае разрабатывается одно из крупнейших в мире Верхнекамское месторождение калийных и магниевых солей (ВКМКМС). Основные производственные комплексы по освоению данного объекта расположены в пределах Соликамско-Березниковского промышленного узла. До последнего времени разработкой месторождения занималась только ПАО «Уралкалий», однако в настоящее время к этому процессу активно подключаются другие компании. ООО «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат» планирует в ближайшие годы запустить крупный Усольский рудник, строит производственные объекты ПАО «Акрон». В результате суммарное производство готовой солесодержащей продукции может превысить 20 млн т/год.

Такие большие объемы производства неизбежно усилят воздействие на окружающую природную среду, на ее отдельные компоненты. Наибольшей нагрузке подвержены поверхностные водные объекты, что определяется спецификой принятых производственных процессов как добычи руды, так и извлечения из нее полезных компонентов. В настоящее время удельный объем образования избыточных рассолов на предприятиях ВКМКМС составляет 1 м³ рассолов на 1 т готовой продукции. Соответственно, при современном объеме производства в 10 млн т/год объем избыточных рассолов достигает 10 млн м³/год. Наличие такого большого количества загрязненных сточных вод формирует одну из главных экологических проблем Пермского края.

Отведение значительных объемов избыточных рассолов в водный бассейн привело к увеличению содержания хлоридов в р. Каме (Воткинском водохранилище) в районе г. Перми более чем в 10 раз по сравнению с периодом до активного освоения ВКМКС. В обозримой перспективе при расширении производственной мощности в ПАО «Уралкалий», запуске дополнительных производств в ООО «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат» и ПАО «Акрон» следует ожидать роста объема избыточных рассолов до 20 млн м³/год. С переходом на комбинированные схемы обогащения руд по примеру предприятий немецкого концерна Kali und Salz, занимающегося добычей и обогащением калийной руды, возможно снижение избыточных рассолов в 3 раза. Однако даже в этом случае остается проблема утилизации избыточных рассолов объемом около 7 млн м³/год.

Эта проблема в более общей постановке – по отношению и к другим отходам горно-химического производства – привлекает все большее внимание отечественных и зарубежных специалистов [1–11].

Обоснование условий и порядка регулируемого сброса избыточных рассолов в речную сеть

Возможны несколько путей решения указанной выше проблемы.

1. Технологический путь (создание безотходных схем производства готовой продукции; внедрение комбинированных схем обогащения, позволяющих существенно снизить удельные объемы образования избыточных рассолов; перенос технологических процессов, связанных с обогащением руды, в выработанное пространство шахт и др.).

2. Использование избыточных рассолов в народном хозяйстве (закачка в нефтяные скважины для поддержания внутрискважинного давления; использование в качестве средств для борьбы с обледенением дорог; производство жидких минеральных удобрений и других химических продуктов, например соды).

3. Захоронение в геологических структурах и в выработанном пространстве шахт.

4. Разбавление рассолов до экологически приемлемого уровня путем их отведений в поверхностные водные объекты.

С учетом огромного объема избыточных рассолов, подлежащих утилизации, наиболее реальным из перечисленных является четвертый путь.

В настоящее время накоплен опыт сброса избыточных рассолов в основной водный объект в пределах Соликамско-Березниковского промышленного узла – р. Каму (Камское водохранилище).

Авторами статьи была рассчитана ассимилирующая способность Камского водохранилища в районе г. Березники. Под этим показателем понимается способность водного объекта принимать определенную массу загрязняющих веществ в единицу времени, без нарушения норм качества воды в контрольной точке или пункте водопользования. В работе рассчитаны потенциальные объемы загрязняющих веществ, которые рассматриваемые водные объекты могут ассимилировать в течение года. Расчет проводили по формуле

$$W_{зв_i} = \bar{Q}(C_{пдж_i} - C_{ф_i}) \cdot 31,536 \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где $W_{зв_i}$ – объем i -го загрязняющего вещества, который рассматриваемый водный объект может ассимилировать за весь год, тыс. т/год; \bar{Q} – среднегодовой расход воды в рассматриваемом водном объекте, м³/с; $C_{пдж_i}$ – предельно допустимая концентрация i -го загрязняющего вещества, мг/дм³; $C_{ф_i}$ – фоновая концентрация i -го загрязняющего вещества, мг/дм³.

Расчеты были выполнены за многолетний период, охватывающий годы различной водности. Анализ результатов расчета потенциальной вместимости загрязняющих веществ р. Камы в пределах Соликамско-Березниковского промышленного узла показал, что данный водоприемник может успешно ассимилировать хлориды (до 4 млн т/год), магний (до 800 тыс. т/год), сульфаты (до 1,5 млн т/год) и кальций (до 3 млн т/год) даже в самые маловодные годы. Однако необходимо учитывать, что для Камы характерна весьма существенная внутригодовая неравномерность стока, поэтому рассматривается возможность организации регулируемого сброса сточных вод. Это стало возможным с внесением изменений в Методику по приказу МПР России № 339 от 29.07.2014 [12].

Формально при наличии регулируемой емкости, способной аккумулировать сбрасываемые стоки в течение достаточно длительного промежутка времени, можно выделить два предельных типа регулируемого (управляемого) сброса:

- жесткое регулирование в зависимости от гидрологического и гидрохимического режима водотокоприемника в строгом соответствии с условием $C_{ф_i}/C_{пдж_i} \leq 1$;
- сброс с некоторым постоянным расходом в течение определенного периода T , ориентированный на минимальный месячный расход с обеспеченностью 95 % за рассматриваемый период T ; при этом единственным регулируемым параметром является априорно устанавливаемая продолжительность сброса T во время прохождения высоких расходов воды.

В итоге были рассчитаны потенциальные объемы загрязняющих веществ, которые рассматриваемые водные объекты могут принять за сутки по данным наблюдаемых гидрохимических проб и расходов воды в день отбора пробы (по I типу регулирования) и за каждый месяц в течение года (по II типу).

Большой интерес в случае организации регулируемого сброса представляет также потенциальная возможность водного объекта вместить загрязняющие вещества, если их сбрасывать только в период весеннего половодья. Этот тип регулирования схож со II из вышеперечисленных, однако не требует строгого слежения за водностью водотокоприемника в течение всех месяцев года, а устанавливаемая продолжительность сброса T равна продолжительности весеннего половодья. Для этого типа регулирования также были рассчитаны потенциальные объемы загрязняющих веществ, которые рассматриваемые водные объекты могут принять за период весеннего половодья. При этом концентрации рассчитывали как средние по данным гидрохимических проб в период весеннего половодья за весь период наблюдений.

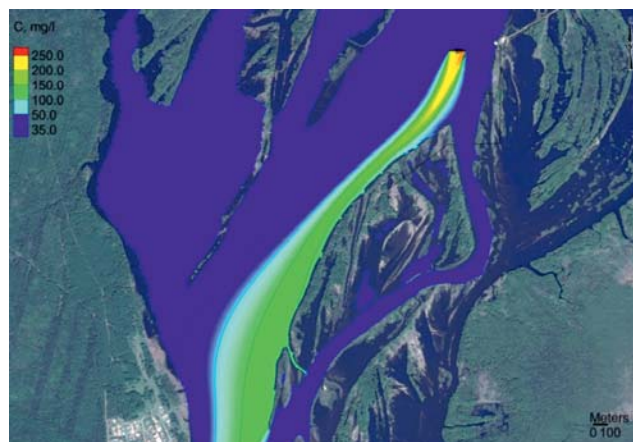
Таким образом, р. Кама (Камское водохранилище) в пределах Соликамско-Березниковского промышленного узла может принять без ухудшения своих водохозяйственных показателей примерно 4 млн м³ избыточных рассолов с ориентацией на минимальный месячный расход 95 % обеспеченности. При реализации регулируемого отведения рассолов в зависимости от гидрологического и гидрохимического режима, с аккумуляцией в межень период и активным сбросом в период прохождения паводка, отведение сточных вод может быть, как минимум, в 4,5 раза больше, т. е. возможен сброс около 18 млн м³/год [4, 5, 13]. Выходит, что ассимилирующая емкость р. Камы вполне могла бы справиться не только с современным объемом избыточных рассолов, но и с его возможным ростом в ближайшей перспективе.

Однако необходимо подчеркнуть, что данные оценки получены при следующих очень серьезных допущениях: обеспечивается полное разбавление отводимых стоков уже к створам начального разбавления; полностью исключаются неуправляемые, слабо контролируемые, рассредоточенные, диффузные источники загрязнения, обусловленные фильтрационными разгрузками из шламохранилищ и породных отвалов.

Характерная особенность избыточных рассолов – это их повышенная минерализация, а соответственно, и высокая плотность; в этих условиях достижение эффективного разбавления является весьма сложной и дорогостоящей задачей. Также весьма сложной задачей является снижение фильтрационных разгрузок из шламохранилищ. В то же время регулируемый сброс сточных вод в водные объекты имеет такое важное преимущество в плане обеспечения экологической безопасности по сравнению с захоронением в подземные горизонты, как минимальная инерционность рассматриваемых процессов. Если в контрольном створе будет в автоматическом режиме зафиксировано превышение допустимого уровня загрязнения воды, то практически мгновенно оно может быть устранено путем изменения режима сброса.

Основные риски при сбросе избыточных рассолов в поверхностные водные объекты заключаются в снижении надежности р. Камы и Камского водохранилища как основного источника технического водоснабжения для всего Соликамско-Березниковского промышленного узла. Сброс рассолов высокой плотности без начального их разбавления приводит к значительной вертикальной неоднородности содержания загрязняющих веществ по глубине водохранилища. На отдельных его участках содержание загрязняющих веществ в придонной области более чем на порядок превышает их содержание в поверхностных горизонтах. Так как оголовки коммунального водозабора располагаются, как правило, на значительной глубине в силу необходимости поддержания его устойчивой работы во время глубокой зимней межени, то создается угроза качеству откачиваемых вод.

Гидродинамические аспекты описания поведения избыточных рассолов в водных объектах рассматриваются в [5, 13, 14]. Чтобы иметь возможность использовать в достаточной мере ассимилирующий потенциал водного объекта, необходимо, согласно



Зона распространения загрязнения при расходе воды по р. Каме 931 м³/с при уровне воды 108,56 м Балтийской системы

действующим нормативным документам [12], обеспечить требуемое начальное смешение отводимых сточных вод. Традиционно эффективное начальное смешение обеспечивается различными конструкциями рассеивающих водовыпусков. Ранее выполненные исследования [4–6] показали, что отводимые рассолы без предварительного, очень существенного начального разбавления могут распространяться на значительное расстояние в придонной области, создавая существенную нагрузку на бентосную биоту. Все это требует отработанной специальной системы водоотведения, удовлетворяющей указанным выше условиям. При этом сама процедура выбора размещения рассеивающего выпуска на водохранилищах речного типа достаточно жестко регламентирована Рекомендациями [15].

При отработке технологических и конструктивных решений проведение натурных экспериментов практически невозможно из-за их громоздкости, необходимости соблюдения водного законодательства в части охраны вод, а лабораторные исследования весьма некорректны из-за сложности одновременного обеспечения подобия по комплексу динамических (числа Рейнольдса Re , Фруда Fr), а также плотностных критериев (число Ричардсона Ri). Поэтому в качестве основного инструмента решения поставленной задачи были использованы вычислительные эксперименты на современном суперкомпьютере (кластер «Уран» Института математики и механики УрО РАН). Вычислительный эксперимент был реализован на основе сопряжения гидродинамических моделей в 1-, 2- и 3-мерной постановках. Технология таких расчетов неоднократно обсуждалась в отечественных и зарубежных изданиях.

Для оценки акватории загрязнения за пределами зоны начального разбавления были использованы результаты двумерного моделирования, выполненного с использованием программного продукта SMS v12 (см. рисунок). Поскольку рассматриваемая область размещения водовыпуска является зоной переменного подпора Камского водохранилища, моделирование зон загрязнения проводилось для различных гидрологических и метеорологи-

ческих условий. На рисунке представлены результаты моделирования для сценария, наиболее характерного для периода летней межени, без учета ветрового воздействия. Полученные данные показали, что в большинстве рассмотренных вариантов не наблюдается превышений предельно допустимых концентраций, если рассматривать концентрации, осредненные по всей глубине потока. В случае неблагоприятных метеорологических условий (южный ветер, 15 м/с) наблюдается лишь незначительное распространение загрязняющих веществ выше по течению.

Анализ представленных конструкторских и технологических решений по рассеивающему выпуску избыточных рассолов показал, что для условий Камского водохранилища в районе Соликамско-Березниковского промышленного узла приоритетным может считаться вариант с придонным отведением стоков. Это прежде всего обусловлено особенностями гидрологического режима рассматриваемого водоприемника: значительными внутригодовыми колебаниями уровня воды и ледовым режимом. В данном случае при сбросе избыточных рассолов необходимо использовать селективный отбор отводимых стоков из шламохранилища, что в значительной мере повысит эффективность работы данного сбросного устройства.

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 6, pp. 21–24
DOI: 10.17580/gzh.2018.06.04

Features of excess brine discharge in surface water bodies at potash industry objects

Information about authors

A. P. Lepikhin¹, Head of Laboratory, Professor, Doctor of Geographical Sciences, lepin49@mail.ru

A. V. Bogomolov¹, Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹ Mining Institute, Perm Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

Abstract

In consequence of large-scale development of the Upper Kama Potash Deposit, the Solikamsk-Berezniki industrial hub has become the first-string source from which mineral substances (first of all, ions of potassium, magnesium and chlorides) enter the Kama River. This situation has come into being for the most part due to discharge of production waste in the form of excess brines to the river network. At present, with the accepted technology of potassium ore extraction and processing, excess brines of the local potash industry make 10 Mm³/yr. Minimization of impact from such great volume of contaminated waste water is one of the ecological challenges in the Perm Krai.

Analysis of the calculation results on the potential storage capacity of the Kama River within the Solikamsk-Berezniki industrial hub shows that this water receiver can readily assimilate chlorides (up to 4 Mt/yr), magnesium (to 800 thou t/yr), sulfates (to 1.5 Mt/yr) and calcium (to 3 Mt/yr) even in the exceptionally low-water years. In view of annual irregularity of effluence, the controlled water discharge arrangement capabilities are under consideration.

This article examines different ways to solve the problem. The least risk and the highest technical capabilities are provided by the method of hydrologically and hydrochemically controlled waste water discharge in the Kama River (Kama Reservoir). Within the framework of this variant, the assimilation ability of this water body in the water discharge cross-section is calculated, and the hydrodynamic model analysis of the contamination water area beyond the zone of initial dilution of excess brines under different discharge conditions is performed. It is shown that for the efficient initial dilution of very high-density excess brines and for the effective use of the assimilation ability of the Kama River, the discharge outlet should be dispersive. The analysis of process and design solutions on the dispersive discharge outlet shows that for the Kama Reservoir (Kama River) in the area of the Solikamsk-Berezniki industrial hub, the priority variant is the near-bottom waste water discharge.

Keywords: Upper Kama deposit, potash salt, excess brines, hydrodynamic modeling, waste water discharge, potash ore processing, Kama River (Kama Reservoir).

Заключение

Утилизация избыточных рассолов предприятий калийной промышленности является весьма важной экологической и технологической проблемой.

Для условий ВКМКС наиболее приемлемым подходом к решению данной проблемы является реализация регулируемого сброса избыточных рассолов в речную сеть путем соотношения объема отводимых стоков с реальными расходами воды в водоприемнике. Регулируемый сброс рассолов в зависимости от гидрологического и гидрохимического режимов водотокоприемников позволяет более полно использовать их ассимилирующий потенциал и без проведения каких-либо других дополнительных водоохраных мероприятий способен существенно снизить пики концентрации загрязняющих веществ, наблюдающиеся при минимальных расходах водотокоприемников. В данной работе на основе вычислительных экспериментов проведен выбор оптимальной конструкции и схемы отведения избыточных рассолов.

Библиографический список

См. англ. блок. **ГЖ**

References

- Kazakova N. A., Gendon A. L., Khlevnaya E. A. Development potential of Russian mining-and-chemical holdings. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 7. pp. 89–91. DOI: 10.17580/gzh.2016.07.19
- Ilinova A. A., Cherepovitsyn A. E., Larichkin F. D. Branch peculiarities of framing competitive strategies in the mining chemical industry. *Vserossiiskii ekonomicheskii zhurnal EKO*. 2014. No. 1. pp. 121–135.
- Churov V. A., Shemet S. F., Shutin S. G. Environment-oriented methods while placing the potash production wastes. *Gornyi Zhurnal*. 2010. No. 8. pp. 86–88.
- Lepikhin A. P., Lyubimova T. P., Parshakova Ya. N., Tiunov A. A. Discharge of excess brine into water bodies at potash industry works. *Journal of Mining Science*. 2012. Vol. 48, No. 2. pp. 390–397.
- Lyubimova T. P., Lepikhin A. P., Parshakova Ya. N., Tsiberkin K. B. Numerical modeling of liquid waste infiltration from storage facilities into surrounding and surface water bodies. *Computational Continuum Mechanics*. 2015. Vol. 8, No. 3. pp. 310–318.
- Lubkowski K. Environmental impact of fertilizer use and slow release of mineral nutrients as a response to this challenge. *Polish Journal of Chemical Technology*. 2016. Vol. 18, Iss. 1. pp. 72–79.
- Cañedo-Argüelles M., Brucet S., Carrasco S., Flor-Arnau N., Ordeix M., Ponsá S., Coring E. Effects of potash mining on river ecosystems: An experimental study. *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 224. pp. 759–770.
- Giern S., Gienke J. Der Sevilla-Prozess – Untertageverwertung ist beste verfügbare Technik. *Kali und Steinsalz*. 2014. Heft 1. ss. 6–11.
- Yin H., Zhu J. In situ remediation of metal contaminated lake sediment using naturally occurring, calcium-rich clay mineral-based low-cost amendment. *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 285. pp. 112–120.
- Malinovskaya E. A. JSC “Belaruskali” negative effect on environment. *Safety of activities for Russian enterprises in industrially developed regions: XI International scientific and practical conference proceedings*. Kemerovo : KuzGTU, 2015. pp. 45–52.
- Borzakovskiy B. A., Rusakov M. I. Technology of slurry placement in geotubes in underground excavations. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 3. pp. 91–94. DOI: 10.17580/gzh.2015.03.15
- Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902083726> (accessed: 19.04.2018)
- Lepikhin A. P., Voznyak A. A., Tiunov A. A., Bogomolov A. V. On the Issue of Correction of Calculation Methods and Initial Hydrological and Hydrochemical Information Input in the Process of Regulation of the Technogenic Impacts on Water Bodies. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2017. No. 1. pp. 58–77.
- Grankin Yu. Ya., Tumler V. A., Tumler E. V., Gritsenko N. V. Brine utilization at desalination of salt-water getting industrial salt and fertilizers. *Science and World*. 2015. Vol. 1, No. 8(24). pp. 32–36.
- Guidelines on design and location of dispersive waste water discharge. Moscow : Stroyizdat, 1981. 224 p.