

Processes in Mineral resources processing: Theory and Practice : Collection of scientific papers from International Scientific-Technical Conference. Saint Petersburg, May 19–20, 2015). Saint Petersburg, 2015. pp. 44–45.

- Titkov S., Sabirov R., Novoselov V. The Flotation of Water-Soluble Minerals – Peculiarities and new Technologies. Proceedings of the Symposium "100 years of flotation". Brisbane, Australia, 2009. pp. 705–802.
- Titkov S. N. Razvitiye tekhnologii flotatsionnogo obogashcheniya vodorastvorimykh poleznykh iskopaemykh (Technology development for flotation concentration of water-soluble minerals). *Gornyi Zhurnal = Mining Journal*. 2007. No. 8. pp. 20–24.
- Zhelinin A. A. *Teoreticheskie osnovy i praktika flotatsii soley* (Theoretical basis and practice of salts' flotation). Leningrad : Khimiya, 1973. 184 p.
- Tusupbaev N. K., Bekturganov N. S. Usovershenstvovanie tekhnologii flotatsionnogo obogashcheniya tonkovkraplennykh polimetallicheskih rud s primeneniem modifitsirovannykh reagentov (Improvement of the technology of flotation concentration of finely disseminated polymetallic ores using modified reagents). *Plakinskie chteniya : sbornik materialov* (Plaksin readings : collection of materials). Almaty, Kazakhstan, 2014. pp. 242–244.
- Teterina N. N., Sabirov R. Kh., Skvirskiy L. Yu., Kirichenko L. N. *Tekhnologiya flotatsionnogo obogashcheniya kaliynykh rud* (Technology for flotation concentration of potassium ores). Edited by N. N. Teterina. Perm : Solikamskaya tipografiya, 2002. 484 p.
- Yue Hua Tan, James A. Finch Surfactant Structure-Property Relationship: Effect of Alkyl Chain Length and Methyl Branch Position in Aliphatic Alcohols and Polyglycol Ethers on Bubble Rise Velocity. Proceedings of the XV Balkan mineral Processing Congress. Sozopol, Bulgaria, June 12–16, 2013. pp. 423–427.
- Titkov S. N., Gurkova T. M., Alekseeva E. I., Panteleeva N. N. Vzaimnoe vliyaniye depressora i vspenivatelya na sorbtitsiyu sobiratelya na flotiruemom i porodoobrazuyushchikh mineralakh i flotatsiyu silvina (Mutual influence of depressor and frother on collector sorption on the flotated and rock-forming minerals and on the sylvite flotation). *Obogashchenie rud = Mineral processing*. 2008. No. 1. pp. 20–23.
- Ivanova V. A., Mitrofanova G. V. Rol reagenta Montanol-800 pri flotatsii apatit-karbonat-silikatnykh rud (Role of Montanol-800 reagent in apatite-carbonate-silicate ore flotation). *X Kongress obogateley stran SNG : Sbornik materialov. Tom II* (The X Congress of CIS countries benefactors : collection of materials. Vol. II). Moscow : MISIS, 2015. pp. 386–388.
- Tusupbaev N. K. Fiziko-khimicheskie osnovy sozdaniya novykh reagentov dlya intensivatsii flotatsii polimetallicheskih sulfidnykh rud (Physical-chemical basics for creating new reagents to intensify of polymetallic sulfide ore flotation). *Kombinirovannye protsessy pererabotki mineralnogo syrya: teoriya i praktika : Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Sankt-Peterburg, 19–20 maya 2015* (Combined Processes in Mineral resources processing: Theory and Practice : Collection of scientific papers from International Scientific-Technical Conference. Saint-Petersburg, May 19–20, 2015). Saint Petersburg, 2015. pp. 16–17.
- Pedain Klaus-Ulrich. Foaming agent and flotation method for flotation of insoluble components of raw salts. Patent USA, No. 8496115. Applied: January 24, 2009. Published: July 30, 2013.
- Devarayasamudram R. Nagaraj. *Novye ditiokarbamatnye agenty dlya pennoy flotatsii i ikh ispolzovanie pri obogashchenii mineralnykh rudnykh tel* (New dithiocarbamate reagents for foam flotation and their use for concentration of mineral ore bodies). Cytec Technology Corporation (USA). Applied: January 21, 2008.
- Titkov S., Sabirov R. et al. Investigation of cation flotation's activation using new reagents. Proceedings of XXVI Mineral Processing Congress. India, 3–8 September 2012. pp. 1063–1071.
- Cho Y. S., Laskowski J. S. Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability. *International Journal of Mineral Processing*. 2002. 64 (2-3). pp. 69–80.
- Krzan M., Lunkenheimer K., Malysa K. On the influence of the surfactant's polar group on the local and terminal velocities of bubbles. *Colloids and Surfaces A: physicochemical and Engineering Aspects*. 2004. 250 (1-3). pp. 431–441.
- Amini G. R. Mollataheri H., Abdollahi, A. R. Raes Flotation of Sylvite in potassium Sample of Pohl Deposit in Iran. Proceedings of the XIV Balkan Mineral Processing Congress. Tuzla, 14–16 June 2011. Vol. 1. pp. 179–184.
- Laskowski J. S., Yuan X.-M., Alonso E. A. Optimisation of Collector, Slime Modifier and Frother Usage in potassium Ore Flotation. Proceedings of the XV Mineral Processing Congress. Bulgaria, June 2013. pp. 71–78.

УДК 66.061:62-501.7+661.832

## СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РАСТВОРЕНИЯ СИЛЬВИНИТОВЫХ РУД НА ГАЛУРГИЧЕСКИХ ФАБРИКАХ



**В. И. ТИМОФЕЕВ**,  
заведующий лабораторией,  
timofeev@galurgy.spb.ru



**К. С. КИРИШ**,  
младший научный  
сотрудник



**Т. И. РУТКОВСКАЯ**,  
ведущий научный  
сотрудник,  
канд. техн. наук

АО «ВНИИ Галургии», Санкт-Петербург, Россия

### Введение

Управление расходом руды в отделении растворимости на галургических фабриках реализуется путем регулирования соотношения «руда : щелок» в целях стабильного получения раствора с заданной (высокой) степенью насыщения KCl с учетом температурного режима на стадии растворения руды с максимальным выщелачиванием из нее KCl. Для этого необходимо, чтобы количе-

Констатируя большое число и изменчивость взаимовлияющих технологических параметров добычи и обогащения калийных руд, связанные с этим потери производства, авторы предлагают и показывают основные направления оптимизации системы управления процессами подачи и выщелачивания сильвинитовых руд на основе сбалансированного регулирования соотношения «руда : щелок» в целях стабильного получения продуктивного раствора с заданной степенью его насыщения хлористым калием и минимизацией потерь KCl с галитовыми отходами.

Дано подробное описание разработанных авторами стохастической и аналитической математических моделей процесса растворения (выщелачивания) сильвинитовых руд, являющихся основой физического создания автоматизированной системы управления технологическими процессами.

**Ключевые слова:** добыча и обогащение сильвинитовых руд, соотношение «руда : щелок», выщелачивание, продуктивный раствор, потери с отходами, технологические параметры, стохастическая и аналитическая математические модели, автоматизированная система управления и контроля.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.04.13>

Таблица 1. Параметры среднего щелока на сильвинитовых ОФ

Предприятие	Температура в сливе растворителя, °С	Параметры среднего щелока	
		Плотность жидкой фазы, т/м <sup>3</sup>	Массовая доля КСl, %
Сильвинитовая обогатительная фабрика Четвертого Березниковского рудоуправления (СОФ БКПРУ-4)	96–98	1,228–1,242	15,0–18,0
Сильвинитовая обогатительная фабрика Первого Соликамского рудоуправления (СОФ СКРУ-1)	91–93	1,226–1,232	13,6–13,8

ство КСl, вводимого в цикл производства с рудой, было эквивалентно емкости растворяющего щелока по КСl.

**Пути управления процессом растворения сильвинитовых руд**

Традиционно в галургии управление соотношением руда : щелок осуществляли «по среднему щелоку» как в производстве хлористого калия, так и при обогащении карналлита с нормированием плотности жидкой фазы среднего щелока.

С освоением калиметров в технологии производства хлористого калия в качестве критерия для управления соотношением «руда : щелок» начали использовать значение массовой доли КСl в среднем щелоке [1, 2]. При этом контроль его плотности, который осуществляется периодически аппаратчиком либо персоналом ОТК, сохраняется и нормируется, что отражено в действующих технологических регламентах производства.

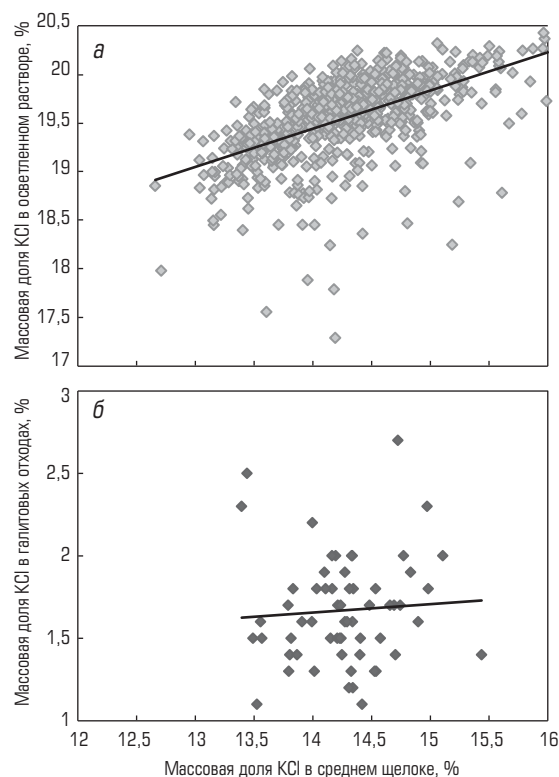
Нормы технологического режима по массовой доле КСl в среднем щелоке и плотности его жидкой фазы индивидуальны для каждой сильвинитовой фабрики (табл. 1) и связаны в значительной степени с температурным режимом растворения руды. На обогатительной фабрике БКПРУ-4 процесс растворения руды протекает при более высоких температурах и с большей интенсивностью в сравнении с сильвинитовой обогатительной фабрикой (СОФ) СКРУ-1, поэтому если массовая доля КСl в среднем щелоке на СОФ БКПРУ-4 нормируется в диапазоне от 15 до 18 %, то на СОФ СКРУ-1 — в диапазоне 13,6–13,8 %. По данным работы сильвинитовой ОФ СКРУ-1 построены графики (см. рисунок) зависимости массовой доли КСl в галитовых отходах от содержания КСl в среднем щелоке, а также в осветленном насыщенном растворе от КСl в среднем щелоке. Как видно, несмотря на существенный разброс производственных значений, очевидно увеличение массовых долей КСl как в осветленном растворе, так и в галитовых отходах (в меньшей степени) с ростом доли КСl в среднем щелоке.

При этом на содержание КСl в галитовых отходах, помимо степени выщелачивания хлорида калия из руды, что определяет потери КСl с твердой фазой, влияет также эффективность промывки на вакуум-фильтрах и влажность галитовых отходов — факторы, которые не зависят от состава среднего щелока, но определяют потери КСl с жидкой фазой галитовых отходов. Эта часть исследований показала, что параметр массовой доли хлорида калия в среднем щелоке может быть использован как критерий эффективности насыщения продуктивного раствора по КСl.

Калиметры для контроля массовой доли КСl в среднем щелоке устанавливают на действующих сильвинитовых фабриках во втором

растворителе под переточной трубой щелока из второго растворителя в первый. Таким образом обеспечивается исключение влияния остаточного содержания массовой доли КСl в нерастворившейся руде (галитовом отвале) на показания калиметра. Недостатком данной системы является запаздывание регулирующего воздействия, так как суспензия уже успевает пройти первый растворитель, время пребывания в рабочем объеме которого составляет 8–10 мин.

В настоящее время на всех сильвинитовых ОФ осуществляется автоматизированный контроль массовой доли КСl в руде. На СОФ СКРУ-1 реализована система автоматизированного управления (САУ) расходом руды, основанная на стабилизации массы хлористого калия, вводимого в процесс в зависимости от его массовой доли в руде. В САУ вводят задание по расходу КСl, поступающего в процесс с рудой, которое должно соответствовать заданному выходу готового продукта с учетом извлечения КСl. Например, при заданной производительности ОФ по готовому про-



**Взаимосвязь массовой доли КСl в осветленном насыщенном растворе (а) и галитовых отходах (б) с массовой долей хлорида калия в среднем щелоке (ОФ СКРУ-1, март 2015)**

**Таблица 2. Уровни факторов (независимых переменных) и интервалы их варьирования в модели стадии растворения руды**

Наименование параметров	Уровни факторов			
	Базовый	Интервал варьирования	Нижний	Верхний
Массовая доля, доли ед.:				
KCl в руде	0,3	0,04	0,26	0,34
KCl в растворяющем щелоке	0,125	0,025	0,100	0,15
NaCl в растворяющем щелоке	0,1875	0,0075	0,18	0,195
Расход растворяющего раствора на 2 нитки, м <sup>3</sup> /ч	1890	190	1700	2080
Температура в первом растворителе, °С	97	1	96	98

дукту 100 т/ч, плановом извлечении KCl из руды в продукт 87 % и нормативном качестве продукта 95,5 % KCl поступление KCl с рудой должно составить 110 т/ч. В автоматическом режиме осуществляется регулирование расхода руды в зависимости от содержания в ней KCl таким образом, чтобы в процесс постоянно поступало 110 т/ч хлорида калия.

Управление расходом руды на стадии растворения осуществляется, как правило, путем изменения положения шибера на выгрузке ее из бункеров на конвейеры подачи руды в первый растворитель. Массовая доля KCl в руде контролируется с помощью калиметров, установленных на конвейерах под бункерами руды, а соответствующее плавное изменение расхода руды обеспечивается с помощью современных дозаторов, оснащенных частотными преобразователями, что позволяет регулировать скорость движения дозатора и за счет этого — расход руды, подаваемой на растворение. При этом калиметры устанавливают непосредственно на дозаторах, которые обеспечивают более стабильный уровень слоя руды в сравнении с конвейерами, за счет чего достигается более высокая точность измерения параметра — массовой доли KCl в руде.

В АО «ВНИИ Галургии» разработаны математические модели процесса растворения сильвинитовой руды в статике [3, 4].

Стохастическая модель разработана с использованием классических методов математического планирования [5–11]. В модели растворения сильвинитовых руд принято пять факторов (независимых переменных): массовая доля KCl в руде; массовая доля KCl в растворяющем щелоке; массовая доля NaCl в растворяющем щелоке; расход оборотного раствора, складывающийся из расходов горячего растворяющего щелока и холодного раствора; температура насыщенного раствора (слива первого растворителя), характеризующихся уровнем и интервалом варьирования на стадии растворения руд (табл. 2) [12]. Условно-постоянные параметры, принятые при расчете функции отклика — расхода руды  $Q_{руды}$ , представлены ниже.

Степень выщелачивания KCl из руды, доли ед.	0,977
Степень насыщения щелока по KCl, доли ед.	0,98
Массовая доля MgCl <sub>2</sub> в руде, %	0,15
Массовая доля H <sub>2</sub> O в руде, %	0,97
Массовая доля MgCl <sub>2</sub> в растворяющем щелоке, %	0,67
Расход H <sub>2</sub> O в растворителе на промывку элеваторов, т/ч	18,45

В уравнении регрессии стохастической модели расхода руды  $Q_{руды}$  вошли влияющие на точность расчета коэффициенты и введенные следующие кодированные переменные:

$X_1 = (C_{KCl_{руды}} - 0,3)/0,04$ , где  $C_{KCl_{руды}}$  — массовая доля KCl в руде;

$X_2 = (C_{KCl_{раств.р-р}} - 0,125)/0,025$ , где  $C_{KCl_{раств.р-р}}$  — массовая доля KCl в растворяющем растворе;

$X_3 = (C_{NaCl_{раств.р-р}} - 0,1875)/0,0075$ , где  $C_{NaCl_{раств.р-р}}$  — массовая доля NaCl в растворяющем щелоке;

$X_4 = (Q_{раств.р-р} - 1890)/190$ , где  $Q_{раств.р-р}$  — общий расход растворяющего щелока на две нитки, м<sup>3</sup>/ч;

$X_5 = (t - 97)/1$ , где  $t$  — температура слива первого растворителя, °С.

Общий вид уравнения регрессии:

$$Q_{руды} = 794,102 - 106,8248 \cdot X_1 - 248,6180 \cdot X_2 - 15,7637 \cdot X_3 + 77,9058 \cdot X_4 + 14,5659 \cdot X_5 + 33,4263 \cdot X_1 \cdot X_2 + 2,1185 \cdot X_1 \cdot X_3 - 10,4802 \cdot X_1 \cdot X_4 - 1,9667 \cdot X_1 \cdot X_5 - 1,6159 \cdot X_2 \cdot X_3 - 25,0872 \cdot X_2 \cdot X_4 - 1,5915 \cdot X_3 \cdot X_4 + 1,4513 \cdot X_4 \cdot X_5 + 3,3729 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4.$$

Сопоставление результатов расчета расхода руды по уравнению регрессии с данными технологических балансов показало, что уравнение регрессии адекватно — расхождение составляет не более 6 %. При разработке алгоритма управления расходом руды на стадии растворения необходимо учесть ограничение по значению функции отклика (расхода руды). Нижний уровень не нормируется, а верхний составляет 800 т/ч. Это ограничение обусловлено предельной производительностью оборудования.

Разработанная математическая модель включает 15 коэффициентов, является наиболее полной, учитывает парные и тройные взаимодействия независимых переменных. Опыт использования математических моделей применительно к галургическим обогатительным фабрикам показывает, что не следует сокращать количество факторов и их сочетания, так как это снижает точность расчета. Недостатком стохастической модели является невозможность быстрой корректировки в случае изменения условно постоянных параметров и узкий диапазон варьирования уровней факторов (расширение диапазона снижает точность модели).

Аналитическая модель построена на системе уравнений материального баланса и вероятностных уравнениях, описывающих диаграмму растворимости, с использованием независимых исходных параметров в расчетах (табл. 3).

Ниже представлены расчетные формулы с исходными параметрами и их обозначениями по табл. 3:

- расход руды для обеспечения заданного насыщения раствора хлористым калием, т/ч:

$$G_{\text{руды}} = G_{\text{KCl}_{\text{руды}}} / \omega_{\text{KCl}_{\text{руды}}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{KCl}_{\text{руды}}}$  — расход хлористого калия с рудой, т/ч;

- из материального баланса по калию:

$$G_{\text{KCl}_{\text{руды}}} = G_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}} + G_{\text{KCl}_{\text{гал.отв}}} - G_{\text{KCl}_{\text{раств.р-р}}}, \quad (2)$$

где  $G_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}}$  — расход KCl с насыщенным раствором;  $G_{\text{KCl}_{\text{гал.отв}}}$  — расход KCl с галитовым отвалом;  $G_{\text{KCl}_{\text{раств.р-р}}}$  — расход KCl с растворяющим раствором;

- расход KCl с соответствующими потоками, т/ч:

$$G_{\text{KCl}_{\text{гал.отв}}} = G_{\text{KCl}_{\text{руды}}} \cdot (1 - \beta_{\text{KCl}_{\text{руды}}}); \quad (3)$$

$$G_{\text{KCl}_{\text{раств.р-р}}} = G_{\text{раств.р-р}} \cdot \omega_{\text{KCl}_{\text{раств.р-р}}}; \quad (4)$$

- расход KCl с насыщенным раствором, т/ч:

$$G_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}} = \frac{G_{\text{H}_2\text{O}_{\text{нас.р-р}}} \cdot C_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}}}{1000}, \quad (5)$$

где  $G_{\text{H}_2\text{O}_{\text{нас.р-р}}}$  — расход воды с насыщенным раствором, т/ч;

$C_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}}$  — концентрация хлористого калия в насыщенном растворе, т/1000 т H<sub>2</sub>O;

- из материального баланса по воде:

$$G_{\text{H}_2\text{O}_{\text{нас.р-р}}} = G_{\text{H}_2\text{O}_{\text{руды}}} + G_{\text{H}_2\text{O}_{\text{раств.р-р}}} + G_{\text{H}_2\text{O}_{\text{доп}}}, \quad (6)$$

где  $G_{\text{H}_2\text{O}_{\text{руды}}}$  — расход воды с рудой, т/ч;

- расход воды с соответствующими потоками:

$$G_{\text{H}_2\text{O}_{\text{руды}}} = G_{\text{руды}} \cdot \omega_{\text{H}_2\text{O}_{\text{руды}}}; \quad (7)$$

$$G_{\text{H}_2\text{O}_{\text{раств.р-р}}} = G_{\text{раств.р-р}} \cdot \omega_{\text{H}_2\text{O}_{\text{раств.р-р}}}; \quad (8)$$

- концентрация KCl в насыщенном растворе:

$$C_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}} = G_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}}^* \cdot \alpha_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}}, \quad (9)$$

где  $G_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}}^*$  — равновесная концентрация хлористого калия в насыщенном растворе при его температуре и степени насыщения  $\alpha_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}} = 1$ .

Для математического выражения концентрации хлористого калия  $G_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}}^*$  использованы эмпирические уравнения, полученные путем математической обработки экспериментальных данных и описывающие диаграмму растворимости системы KCl-NaCl-MgCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O [5, 13–16]:

$$G_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}}^* = A_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}} - B_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}} \cdot C_{\text{MgCl}_2_{\text{нас.р-р}}}; \quad (10)$$

$$A_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}} = 0,103 + 0,218 \frac{t_{\text{нас.р-р}}}{100} + 0,032 \frac{t_{\text{нас.р-р}}^2}{100}; \quad (11)$$

$$B_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}} = 0,24 + 0,45 \frac{t_{\text{нас.р-р}}}{100} - 0,06 \frac{t_{\text{нас.р-р}}^2}{100}, \quad (12)$$

Таблица 3. Независимые исходные параметры, принятые в расчетах аналитической модели

Технологический параметр	Обозначение	Способ измерения
Массовая доля KCl в руде, доли ед.	$\omega_{\text{KCl}_{\text{руды}}}$	Автоматический
Массовая доля MgCl <sub>2</sub> в руде, доли ед.	$\omega_{\text{MgCl}_2_{\text{р}}}$	То же
Массовая доля H <sub>2</sub> O в руде, доли ед.	$\omega_{\text{H}_2\text{O}_{\text{р}}}$	– « –
Степень выщелачивания хлористого калия из руды, доли ед.	$\beta_{\text{KCl}_{\text{руды}}}$	
Расход растворяющего раствора, т/ч	$G_{\text{раств.р-р}}$	Автоматический
Массовая доля KCl в растворяющем растворе, доли ед.	$\omega_{\text{KCl}_{\text{раств.р-р}}}$	То же
Массовая доля MgCl <sub>2</sub> в растворяющем растворе, доли ед.	$\omega_{\text{MgCl}_2_{\text{раств.р-р}}}$	Аналитический
Массовая доля H <sub>2</sub> O в растворяющем растворе, доли ед.	$\omega_{\text{H}_2\text{O}_{\text{раств.р-р}}}$	То же
Степень насыщения раствора по KCl, доли ед.	$\alpha_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}}$	
Температура насыщенного раствора, °C	$t_{\text{нас.р-р}}$	Автоматический
Дополнительный расход H <sub>2</sub> O в растворителе, т/ч	$G_{\text{H}_2\text{O}_{\text{доп}}}$	То же

где  $A_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}}$ ,  $B_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}}$  — температурные коэффициенты растворимости KCl;  $C_{\text{MgCl}_2_{\text{нас.р-р}}}$  — концентрация хлористого магния в насыщенном растворе, т/1000 т H<sub>2</sub>O, определяемая по формуле

$$C_{\text{MgCl}_2_{\text{нас.р-р}}} = \frac{G_{\text{MgCl}_2_{\text{нас.р-р}}} \cdot 1000}{G_{\text{H}_2\text{O}_{\text{нас.р-р}}}}, \quad (13)$$

где  $G_{\text{MgCl}_2_{\text{нас.р-р}}}$  — расход хлористого магния с насыщенным раствором, т/ч.

Из материального баланса по магнию

$$G_{\text{MgCl}_2_{\text{нас.р-р}}} = G_{\text{MgCl}_2_{\text{руды}}} + G_{\text{MgCl}_2_{\text{раств.р-р}}}, \quad (14)$$

где  $G_{\text{MgCl}_2_{\text{руды}}}$  — расход хлористого магния с рудой, т/ч,  $G_{\text{MgCl}_2_{\text{раств.р-р}}}$  — расход хлористого магния с растворяющим раствором, т/ч.

Расход хлористого магния с соответствующими потоками:

$$G_{\text{MgCl}_2_{\text{руды}}} = G_{\text{руды}} \cdot \omega_{\text{MgCl}_2_{\text{руды}}}; \quad (15)$$

$$G_{\text{MgCl}_2_{\text{раств.р-р}}} = G_{\text{раств.р-р}} \cdot \omega_{\text{MgCl}_2_{\text{раств.р-р}}}. \quad (16)$$

Оптимальную степень насыщения раствора по KCl выбирают в интервале от 0,95 до 1 в зависимости от глубины измельчения руды, поступающей на выщелачивание, типа и размеров применяемых растворителей. Решая эти уравнения совместно, например методом последовательных приближений в среде Excel, определяют искомый расход руды  $G_{\text{руды}}$  [17–20].

Аналитическая модель более сложная, чем стохастическая, однако она позволяет работать в широком диапазоне изменения воздействующих факторов и учесть колебания практически всех технологических параметров, влияющих на процесс растворения и управления им. Установление зависимости степени насыщения раствора  $\alpha_{\text{KCl}_{\text{нас.р-р}}}$  и степени выщелачивания  $\beta_{\text{KCl}_{\text{руды}}}$  от грануломе-

трического состава поступающей в процесс руды составляет предмет дальнейшего усовершенствования модели.

Предлагаемые способы управления расходом руды, основанные на использовании математических моделей стадии растворения, предусматривают автоматический контроль большого числа технологических параметров: объемного расхода растворяющего щелока; массовой доли KCl в руде, осветленном насыщенном растворе и растворяющем щелоке; температуры насыщенного раствора и растворяющего щелока; плотности растворяющего щелока, а также дополнительный аналитический контроль технологического процесса [21]. Реализация CAU расходом руды на растворение должна сопровождаться техническим перевооружением узла подачи руды из бункеров в первый растворитель.

## Заключение

Оптимальный вариант управления соотношением «руда : щелок» продолжает оставаться важнейшей задачей при разработке АСУТП на галургических ОФ. Из анализа статистических материалов по показателям технологического режима производства в широком диапазоне их изменения следует необходимость внесения корректировок в разработанные модели применительно к конкретным производствам.

Разработка и освоение математических моделей в производстве требует дальнейшего усовершенствования автоматического контроля технологических параметров и экспресс-методов аналитического контроля.

### Библиографический список

1. Пермяков Р. С., Егоров С. В., Колпиков Г. Г., Злобинский А. Г. Технология и автоматизация производства калийных удобрений. — Л.: Химия, 1973. С. 33–43.
2. Головкин Б. Ю., Колпиков Г. Г., Оцуп Р. Р., Нураев Р. Х., Матийко Л. Н. Автоматизация технологических процессов калийных фабрик. Сер. Калийная промышленность. — М.: НИИТЭХИМ, 1988. — 48 с.
3. Патент 2398620 РФ. Способ управления процессом растворения сильвинитовых руд / Ю. С. Сафрыгин, А. В. Паскина, Ю. В. Букша, В. И. Тимофеев; заявл. 04.03.2009; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 25.
4. Патент 2549403 РФ. Способ управления процессом растворения сильвинитовых руд / Ю. С. Сафрыгин, Ю. В. Букша, В. И. Тимофеев, А. В. Паскина, Т. И. Рутковская, К. С. Кириш; заявл. 3.09.2013; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 12.
5. Data science and big data analytics: discovering, analyzing, visualizing and presenting data. — Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc., 2015. — 432 p.
6. Montgomery D. C. Design and analysis of experiments. Eighth edition. — Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc., 2013. — 724 p.
7. Саутин С. Н., Пунин А. Е., Стоянов С. Применение ЭВМ для планирования эксперимента: учеб. пособие. — Л., 1988. — 80 с.
8. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — 279 с.
9. Santner T. J., Williams B. J., Notz W. I. The design and analysis computer experiments. 2003.
10. Mason R. L., Gunst R. F., Hess J. L. Statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and science. 2003.
11. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. — М.: Книга по требованию, 2013. — 203 с.
12. Тимофеев В. И., Букша Ю. В., Паскина А. В. Управление процессом растворения и кристаллизации на галургических фабриках // Горный журнал. 2007. № 8. С. 96–98.
13. Справочник по растворимости солевых систем. — Л.: Химия, 1975. Том II-1. С. 95–119.
14. Свойства галургических растворов и солей. Хлориды натрия, калия и магния: справочник / под ред. Ю. В. Букши, Н. Е. Шестакова. — СПб.: Химия, 1997. — 512 с.
15. Тюрин Ю. Н., Макаров А. А. Анализ данных на компьютере / 3-е изд., перераб. и доп. / под ред. В. Э. Фигурнова. — М.: ИНФРА-М, 2003. — 544 с.
16. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. Introduction to Linear Regression Analysis, 5th edition. — Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc., 2012. — 672 p.
17. Каганов В. И. Компьютерные вычисления в средах Excel и Mathcad. — М.: Горячая линия-Телеком, 2003. — 328 с.
18. Холоднов В. А., Дьяконов В. П., Иванова Е. И., Кирьянова Л. С. Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов: Практическое руководство. — СПб.: АНО НПО Профессионал, 2003. — 480 с.
19. Холоднов В. А., Сиренек В. А., Челикова В. Н., Боровинская Е. С., Крылов В. М. Решение задач безусловной оптимизации с использованием системы компьютерной математики MathCad. — СПб.: СПбГУ, 2010. — 48 с.
20. Rasmuson A., Andersson B., Ollson L., Andersson R. Mathematical Modeling in Chemical Engineering. University Printing House, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York 2014. — 183 p.
21. Морозов В. В., Улитенко К. Я., Ганбаатар Э., Дэлгэрбат Л. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых. — М.: Руда и Металлы, 2013. — 512 с. **БК**

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 4, pp. 66–71  
DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.04.13>

### Process control methods for dissolving the sylvinitic ores at the halurgical (hot leaching) factories

#### Information about author

V. I. Timofeev<sup>1</sup>, Head of the Laboratory, timofeev@galurgy.spb.ru  
K. S. Kirish<sup>1</sup>, Junior Researcher  
T. I. Rutkovskaya<sup>1</sup>, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

<sup>1</sup> VNII Galurgy Stock Co., St. Petersburg, Russia

#### Abstract

The article highlights some of the ways to manage the process of dissolution of sylvinitic ores at halurgical (hot leaching) factories. The object of the dissolution stage is to obtain the solution with high KCl saturation while maximizing KCl leaching from sylvinitic ores. This requires that the amount of KCl, introduced into the process from sylvinitic ores was equivalent by capacitance to the dissolving liquor for KCl subject to the temperature regime at the stage of dissolution. This problem is solved by controlling the ratio of ore: dissolving liquor. The article summarizes the current methods to manage the process of dissolution of sylvinitic ores: the first - the traditional on the density of average liquor produced in the second solvent, and entering the first solvent, the second is used mainly at present, based on the stabilization of the potassium chloride consumption, entering the process depending on the composition of the ore.

There are shortly stated the ways to control the use of mathematical models: a stochastic received by statistical processing of the actual parameters of the process of dissolution by the method of experimental design and analysis, built on probabilistic mathematical equations that describe the diagram of solubility of KCl-NaCl-H<sub>2</sub>O in the presence of MgCl<sub>2</sub> and mass balance equations. Five most important technological parameters influencing the dissolution process in terms of process control were chosen when building a stochastic model. Analytical model most closely reflects the dissolution process. As it is based on the equation, obtained by approximation of the experimental data on the solubility in water-salt system, forming in the production conditions. In the work are reported some process management methods of sylvinitic ore dissolution at hot leaching factories. The task of the dissolution stage is the solution obtainment with high saturation degree on KCl with simultaneous maximum hot leaching KCl from sylvinitic ore. It is necessary, that the amount of KCl entered into process with the sylvinitic ore be equivalent to the dissolving leach (shchelok) capacity for KCl with consideration for the temperature regime of the dissolution stage. This task is solved by management of the ore : liquor (shchelok) ratio. There are stated and analysed the following optimal management methods of the dissolution process: the management system of potassium chloride mass fraction in the "average" leach (shchelok), the management system by mass stabilization of potassium chloride entering in the process with ore and also management systems based on the mathematical models usage: the stochastic model, obtained by statistical processing of actual parameters of technological dissolution process by the experiment planning method and analytical model, set up on probabilistic mathematical equations, which are described dissolution diagram KCl-NaCl-H<sub>2</sub>O in the presence of MgCl<sub>2</sub>.

**Keywords:** Mining and beneficiation of sylvinitic ores, relationship of ore : liquor, leaching process solution, losses with waste, process parameters, stochastic and analytical mathematical models, automated system of control and monitoring.

**References**

- Permyakov R. S., Egorov S. V., Kolpikov G. G., Zlobinskiy A. G. *Tekhnologiya i avtomatizatsiya proizvodstva kaliynykh udobreniy* (Potassium fertilizers production technology and automation). Leningrad : Khimiya, 1973. pp. 33–43.
- Golovkov B. Yu., Kolpikov G. G., Otsup R. R., Nuraev R. Kh., Matiyko L. N. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov kaliynykh fabrik. Seriya "Kaliynaya promyshlennost"* (Automation of production processes at potassium plants. "potassium industry" series). Moscow: NIITEKhim, 1988. 48 p.
- Safrygin Yu. S., Paskina A. V., Buksha Yu. V., Timofeev V. I. *Sposob upravleniya protsessom rastvoreniya silvinitovykh rud* (Process management method for sylvinitic ore dissolution). Patent RF, No. 2398620. Applied: March 04, 2009. Published: September 10, 2010. Bulletin No. 25.
- Safrygin Yu. S., Buksha Yu. V., Timofeev V. I., Paskina A. V., Rutkovskaya T. I., Kirish K. S. *Sposob upravleniya protsessom rastvoreniya silvinitovykh rud* (Process management method for sylvinitic ore dissolution). Patent RF, No. 254940320. Applied: September 03, 2013. Published: April 27, 2015. Bulletin No. 12.
- Data science and big data analytics: discovering, analyzing, visualizing and presenting data. Indianapolis : John Wiley & Sons, Inc., 2015. 432 p.
- Douglas C. Montgomery. *Design and analysis of experiments*. Eighth edition. Indianapolis : John Wiley & Sons, Inc., 2013. 724 p.
- Sautin S. N., Punin A. E., Stoyanov S. *Primenenie elektronno-vychislitel'noy mashiny dlya planirovaniya eksperimenta: Uchebnoe posobie* (Computer use for planning an experiment: tutorial). Leningrad : Lensovet Leningrad Technological Institute, 1988. 80 p.
- Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* (Experiment planning when searching the optimum conditions). Moscow : Nauka, 1976. 279 p.
- Santner T. J., Williams B. J., Notz W. I. *The design and analysis computer experiments*. 2003.
- Mason R. L., Gunst R. F., Hess J. L. *Statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and science*. 2003.
- Charles R. Hicks. *Osnovnye printsipy planirovaniya eksperimenta* (Fundamental Concepts

in the Design of Experiments). Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 2013. 203 p.

- Timofeev V. I., Buksha Yu. V., Paskina A. V. *Upravlenie protsessom rastvoreniya i kristallizatsii na galurgicheskikh fabrikakh* (Control of dissolution and crystallization process at thermal-dissolving-and-crystallizing plants). *Gorniy zhurnal = Mining journal*. 2007. No. 8. pp. 96–98.
- Spravochnik po rastvorimosti solevykh sistem* (Reference book on saline system solubility). Leningrad : Khimiya, 1975. Vol. I–II. pp. 95–119.
- Svoystva galurgicheskikh rastvorov i soley. Khloridy natriya, kaliya i magniya : Spravochnik* (Properties of solutions and salts being used in thermal-dissolving-and-crystallizing processes. Sodium, potassium and magnesium chlorides : Reference book). Edited by Yu. V. Buksha and N. E. Shestakov. Saint Petersburg : Khimiya, 1997. 512 p.
- Tyurin Yu. N., Makarov A. A. *Analiz dannykh na kompyutere* (Computer data analysis). Edited by V. E. Figurnov. 3rd edition, revised and enlarged. Moscow: INFRA-M, 2003. 544 p.
- Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. *Introduction to Linear Regression Analysis*. 5th edition. Indianapolis. John Wiley & Sons, Inc., 2012. 672 p.
- Kaganov V. I. *Kompyuternye vychisleniya v sredakh Excel i MathCad* (Computer calculations in Excel and MathCad). Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2003. 328 p.
- Kholodnov V. A., Dyakonov V. P., Ivanova E. I., Kiryanova L. S. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya khimiko-tekhnologicheskikh protsessov: Prakticheskoe rukovodstvo* (Mathematical modeling and optimization of chemical and technological processes: Practical guidance). Saint Petersburg: Professional, 2003. 480 p.
- Kholodnov V. A., Sirenek V. A., Chepikova V. N., Borovinskaya E. S., Krylov V. M. *Reshenie zadach bezuslovnoy optimizatsii s ispolzovaniem sistema kompyuternoy matematiki MathCad* (Solving the problems of unconditional optimization using the computer mathematics system MathCad). Saint Petersburg :Saint Petersburg State University, 2010. 48 p.
- Anders Rasmuson, Bengt Andersson, Louise Ollson, Ronnie Andersson. *Mathematical Modeling in Chemical Engineering*. University Printing House, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York, 2014. 183 p.
- Morozov V. V., Ulitenko K. Ya., Ganbaatar Z., Delgerbat L. *Razrabotka i primenenie avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* (Development and use of automated control systems for mineral concentration processes). Moscow: "Ore and Metals" Publishing House, 2013. 512 p.

УДК 661.832.321:658.567

## УТИЛИЗАЦИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ РАСТВОРОВ ГАЛУРГИЧЕСКИХ ФАБРИК



**А. В. ПАСКИНА**,  
ведущий научный сотрудник,  
канд. техн. наук,  
timofeev@galurgy.spb.ru



**Ю. С. САФРЫГИН**,  
главный научный  
сотрудник,  
канд. техн. наук

АО «ВНИИ Галургии», Санкт-Петербург, Россия

### Введение

Одним из видов отходов при галургическом производстве, наряду с галитовым отвалом и суспензией глинисто-солевого шлама, являются избыточные растворы. Образование любого вида отходов производства сопровождается потерями полезного компонента [1].

Избыточные растворы формируются из нескольких потоков избыточного количества жидких фаз.

Разработана технология утилизации избыточных растворов путем их выпаривания на противоточной выпарной установке с получением суспензии, жидкая фаза которой насыщена хлористым калием и хлористым натрием при температуре ее кипения. Объединенный сгущенный солевой шлам выводят из процесса, а объединенный осветленный насыщенный раствор направляют на стадию вакуум-кристаллизации хлористого калия.

Технология позволяет ликвидировать жидкие сбросы и потере полезного компонента с избыточными растворами, что, в свою очередь, позволяет снизить норму расхода руды на производство продукции.

Ликвидация жидких сбросов в шламохранище при производстве хлористого калия представляет важный экологический аспект разработанной технологии.

**Ключевые слова:** хлористый калий, вакуум-кристаллизационная установка, выпарная установка, избыточные растворы, рассол, шламохранилище, камеры большого сечения рудника.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.04.14>