

УДК 622.273.2

СГУЩЕНИЕ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ УРАНОВЫХ РУД С ПОЛУЧЕНИЕМ ПАСТЫ ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ



Е. В. КУЗЬМИН,
начальник НИП,
проф., д-р техн. наук,
EViKuzmin@rosatom.ru,
АО «ВНИПИПромтехнологии»,
Москва, Россия



В. С. СВЯТЕЦКИЙ,
первый заместитель
генерального директора –
исполнительный директор,
АО «Атомредметзолото»,
Москва, Россия



В. В. МАРКОВЕЦ,
начальник лаборатории
радиационной безопасности,
ПАО «ППГХО»,
Краснокаменск, Россия

Введение

За 50-летний период деятельности Приаргунского производственного горно-химического объединения по добыче и переработке урановых руд Стрельцовского рудного поля накоплено около 75 млн м³ радиоактивных отходов (РАО), заскладированных в поверхностных хвостохранилищах «Среднее» и «Верхнее», размещенных в 10 км от г. Краснокаменска, в пади Широндукуй. Состав жидких отходов: 34,5 % – хвосты переработки руд на гидрометаллургическом заводе (ГМЗ), 65,5 % – вода. Загрязненная вода частично фильтруется, с поверхности выделяются радон и продукты его распада.

Исследования возможности приготовления закладочных материалов из сгущенных отходов обогащения урановых руд

АО «ВНИПИПромтехнологии», ПАО «ППГХО» проведены исследования по использованию сгущенных РАО переработки урановых руд в качестве закладочного материала для камер подземных рудников. По результатам предварительных испытаний на отходах гидрометаллургической переработки алюмосиликатных руд выявлено, что из сгущенных с применением флокулянтов хвостов ГМЗ возможно получение пасты, содержащей 20–40 % воды. Паста – это продукт нового высокотехнологичного производственного процесса, получаемый путем сгущения отходов переработки руд, с переводом их в качественно новое состояние при до-

Изложены результаты исследований по приготовлению и использованию пастового закладочного материала из сгущенных отходов переработки урановых руд для заполнения отработанных подземных камер, определены реологические свойства и параметры прочности при добавлении вяжущих. Определены меры по снижению радоновыделения из пастовой закладки в атмосферу подземного рудника, разработана технология добычи и переработки урановых руд в режиме замкнутого производственного цикла.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, пастовые закладочные материалы, реологические свойства, прочность на сжатие, радоновыделение, снижение.

DOI: 10.17580/gzh.2018.07.14

бавлению флокулянтов. Добавление цемента придает пасте свойства твердеющей закладки [1–3].

Механизм образования пасты следующий. В процессе сгущения хвостов переработки наиболее мелкие шламовые частицы связываются флокулянтами в крупные, имеющие повышенную плотность. Пастовая закладка выступает как замена традиционным твердеющим закладочным материалам с более выгодными технологическими свойствами, а при подземной добыче урановых руд – это еще инструмент управления радоновыделением из закладки, уложенной в отработанных камерах.

Отличительные свойства пастовой закладки на основе отходов переработки урановых руд следующие. Это плотная гелеобразная масса, соотношение Т:Ж – до 8:2, обладает высокой вязкостью; пески в ней – неосаждаемая взвесь, не разбавляется водой, необходимое количество шламов (частиц крупностью до 2 мкм) – свыше 15 %.

Флокулянты не только образуют крупные частицы из мелких шламов, но также служат смазывающим слоем между телом пасты и трубопроводом в силу своей однополярности, что позволяет успешно транспортировать под давлением вязкую пасту по трубопроводам на значительные расстояния (рис. 1).



Рис. 1. Транспортирование пасты по трубопроводу:

а – смазывающая поверхность контакта с трубой;

б – полусухой материал сгущенной пасты на изломе

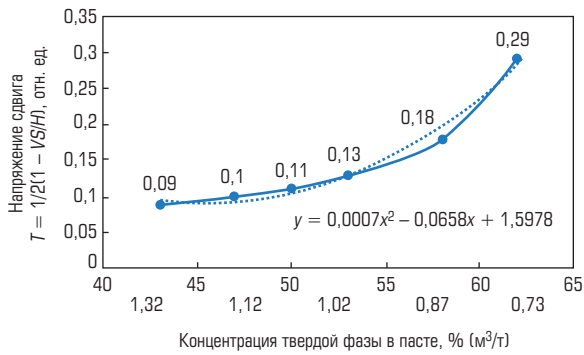


Рис. 2. Зависимость напряжения сдвига от концентрации твердого в пасте при сгущении

В результате лабораторных исследований реологических свойств образцов из отходов переработки установлено, что при добавлении флокулянтов типа ПАА (КНР), Magnaflok 155, BESFLOK в количестве 50–60 г/т шламовые хвосты образуют наиболее крупные флоккулы высокой плотности, вязкость пасты и напряжение сдвига зависят от концентрации твердой фазы [4, 5] (рис. 2).

С добавлением 5–10 % цемента паста приобретает прочность до 2 МПа и более, образуя пастовую закладочную смесь (рис. 3).

Главным препятствием для использования РАО переработки урановых руд в качестве закладочного материала подземных камер является выделение опасного газа радона из оставшихся в хвостах радиоактивных элементов [6–8]. При гидрометаллургической переработке из руды извлекается только уран, остальные радиоактивные элементы находятся в хвостах, и их активность составляет 75 % исходной [9–11]. В результате испытаний, проведенных в лаборатории радиоактивной безопасности ПАО «ППГХО», установлено, что плотность потока радона (ППР) из ма-

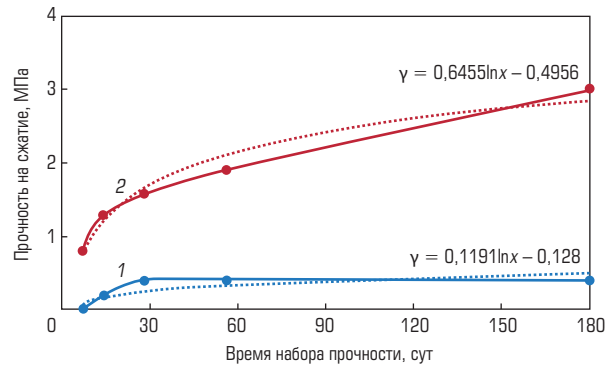


Рис. 3. Изменение прочности пастовой закладочной смеси при добавлении 5 (1) и 10 % (2) цемента

териала пасты в среднем в 2 раза ниже, чем из хвостов переработки [12] (рис. 4). Однако даже это сниженное количество выделяемого радона может вызвать суммарное повышенное содержание радона в рудничной атмосфере (см. рис. 4). Механизм снижения величины ППР из пастовой закладочной смеси, уложенной в подземной камере, приведен на рис. 5 [13].

Существуют несколько методов снижения радоновыделения из пастовой закладочной смеси. Первый заключается в добавлении вяжущего, увеличивающего плотность закладки, что усложняет выделение радона. Добавление цемента в объеме нескольких процентов не показало изменения ППР. Добавление золы уноса также не повлияло на свойства ППР. Введение в состав пасты 3–10 % барита, наиболее тяжелого природного материала, не имеющего радиоизлучения, также не оказало влияния на ППР (рис. 6) [14]. Изменения свойств ППР можно ожидать лишь при значительном увеличении количества добавляемых материалов.

В результате перебора нескольких вариантов найден материал, обладающий гомогенной структурой при нагревании, обеспечивающий подавление радоновыделения, — это природная, техническая сера. В соединении с наполнителями сера при нагревании образует серобетон, заполняя пространство между прочными частицами наполнителя гомогенной массой, обладающей высокими изолирующими свойствами. Измерение уровня радоновыделения из пастовой закладки с покрытиями тонкими слоями серы показало снижение плотности потока радона в 10–25 раз [15–17] (рис. 7).

Другой метод снижения радоновыделения состоит в предварительной подготовке пространства выработок и камер с целью их изоляции от распространения радона из закладочного материала в атмосферу рудника. Существуют несколько видов набрызг-покрытий поверхности камер. Высокой изолирующей способностью обладают специ-

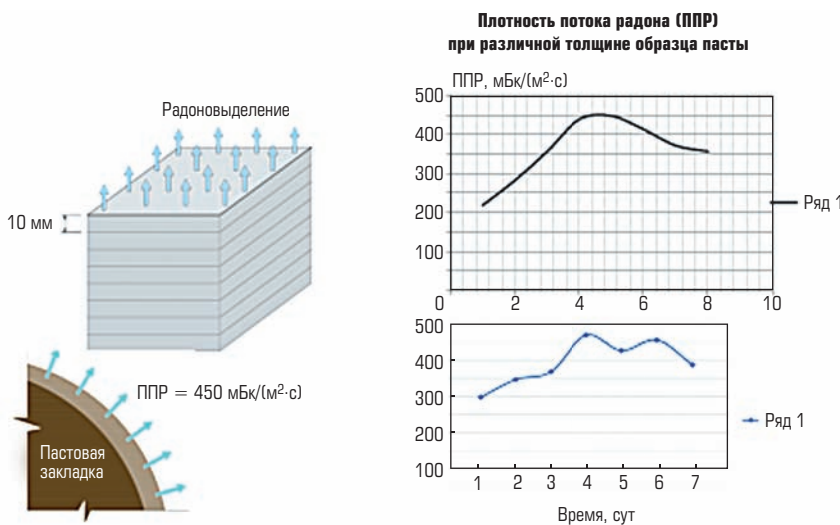


Рис. 4. Ограниченный уровень радоновыделения из пастовой закладочной смеси

ально разработанные полимерные смеси – геомембраны. Это отечественный материал креокор (разработан АО «СНИИП»), геомембраны TSL865 компании BASF, полимерные цементы компании Minova, наносимые на поверхность выработок методом набрызга, напыления. Испытания изолирующих свойств покрытий из полимерной геомембраны TSL865 проведены по принятой методике, результаты испытаний приведены в **таблице**.

Из данных таблицы следует, что при нанесении геомембраны TSL865 толщиной 3 мм ППР снижается в 1,8 раза в сравнении с ППР исходной пасты; при толщине 5 мм ППР снижается в 12 раз; при толщине слоя 8 и 10 мм происходит снижение в 21 и 25 раз, изоляция от радона практически полная. На основании полученных результатов построена зависимость изменения ППР от толщины слоя геомембраны TSL865 во времени (**рис. 8**). Геомембраны TSL865, нанесенные слоем толщиной 5 мм и более, являются надежным изолирующим материалом от радоновыделения из пастовой закладочной смеси при слоевой выемке руды и при использовании камерных технологий. Сдерживающим фактором широкого использования геомембран является пока еще их высокая стоимость.

Урановые руды Аргунского и Жерлового месторождений, которые будут обрабатываться с вводом в строй рудника № 6, характеризуются большим содержанием карбонатов CaCO_3 (более 39 %). Из карбонатных руд уран извлекают с помощью соды Na_2CO_3 , щелочные хвосты переработки содержат избыточную соду. Для извлечения урана из карбонатов осуществляют более мелкое дробление руды в мельницах, сухие хвосты переработки – тонкодисперсная пылевая масса.

Для реализации возможности использования отходов переработки карбонатных урановых руд в виде пасты в настоящее время решают следующие задачи.

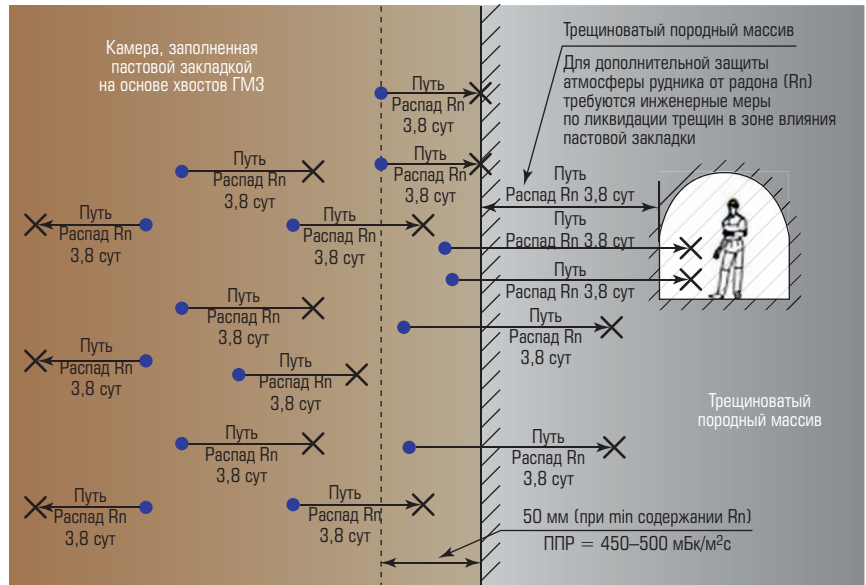


Рис. 5. Схема полураспада атомов радона и его выделения из пастовой закладочной смеси, размещенной в отработанной камере

1. Устанавливают возможность получения пасты из отходов переработки карбонатных урановых руд путем сгущения хвостов ГМЗ с добавлением флокулянтов.
2. Определяют реологические свойства пасты на основе хвостов переработки карбонатных урановых руд.
3. Исследуют прочностные свойства пасты на основе хвостов переработки карбонатных урановых руд при добавлении различных вяжущих (цемент, зола уноса и др.).
4. Измеряют интенсивность радоновыделения (ППР) из пасты на основе хвостов переработки карбонатных урановых руд, устанавливают изолирующий (поглощающий) эффект карбонатами.
5. Выявляют условия нейтрализации хвостов переработки карбонатных руд имеющимися в хвостохранилище кислыми водами.
6. Определяют условия вспенивания хвостов переработки карбонатных руд и пасты, полученной на их основе.

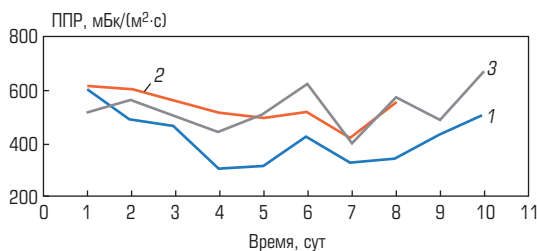


Рис. 6. Изменение свойств ППР пастовой закладочной смеси во времени при добавлении 3 (1), 5 (2) и 10 % (3) барита

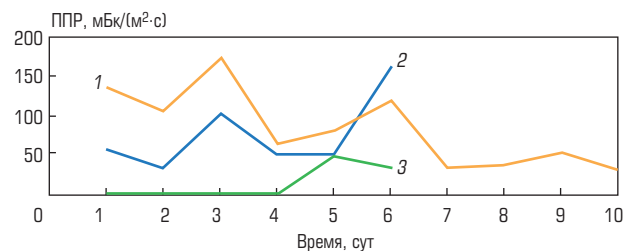


Рис. 7. Изменение во времени свойств ППР пастовой закладочной смеси с изолирующим покрытием из серобетона слоями толщиной 10 (1), 20 (2) и 30 мм (3)

Результаты испытаний изолирующих свойств полимерной геомембраны TSL865

Объект испытаний	Изменение плотности потока радона в процессе испытаний с 18 по 28 апреля 2017 г.										Среднее значение
	18.04	18.04	19.04	19.04	24.04	24.04	25.04	25.04	26.04	26.04	
Исходная паста	18.04	18.04	19.04	19.04	24.04	24.04	25.04	25.04	26.04	26.04	654
	610	732	632	496	543	686	821	709	758	824	
Нанесение изолирующего слоя толщиной 3 мм	18.04	18.04	19.04	24.04	24.04	25.04	26.04	26.04	27.04	27.04	360
	31	23	38	780	343	53	625	755	726	225	
Нанесение изолирующего слоя толщиной 5 мм	18.04	19.04	19.04	24.04	24.04	25.04	26.04	26.04	27.04	27.04	53
	22	119	28	89	23	30	42	60	25	95	
Нанесение изолирующего слоя толщиной 8 мм	18.04	18.04	19.04	24.04	25.04	25.04	26.04	27.04	27.04	28.04	31
	23	39	45	28	25	33	23	35	26	31	
Нанесение изолирующего слоя толщиной 10 мм	18.04	19.04	19.04	24.04	25.04	25.04	26.04	27.04	27.04	28.04	26
	23	32	28	23	24	32	23	17	29	25	

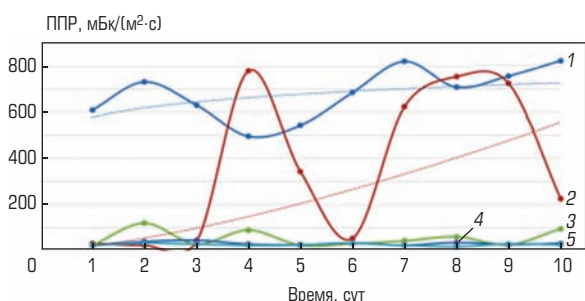


Рис. 8. Измерения плотности потока радона через геомембрану TSL865:

1 – исходная паста; 2, 3, 4, 5 – изолирующий слой 3, 5, 8 и 10 мм соответственно

7. Разрабатывают меры по снижению радоновыделения, рассеивания пылеватых частиц с поверхности хвостохранилища «Среднее» нанесением пасты на основе хвостов переработки карбонатных руд с получением изолирующего слоя.

Повышение экологической безопасности уранодобывающего производства может быть обеспечено при реализации двух взаимосвязанных направлений – технологий добычи и переработки урановых руд. Это, прежде всего, технология пастовой закладки на основе хвостов гидрометаллургической переработки хвостов переработки урановых руд, позволяющая разместить в подземном пространстве текущие хвосты ГМЗ и лежащие хвосты из поверхностных хвостохранилищ в виде твердеющей пастовой закладочной смеси, безопасной для атмосферы подземного рудника и окружающей среды. Одновременно необходимо использовать технологию кучного выщелачивания урана из бедных руд, позволяющую перерабатывать руды на поверхности в объеме 25–40 % всего добываемого годового объема рудной массы. Тем самым будет уменьшен рудопоток на ГМЗ, что позволит разместить в подземном пространстве весь объем текущих хвостов гидрометаллургической перера-

ботки с действующих рудников в виде пастовой закладочной смеси.

При этом реализация технологии безопасного размещения в подземном пространстве хвостов – отходов гидрометаллургической переработки урановых руд – представляется в двух направлениях, дополняющих друг друга:

- перевод хвостов ГМЗ в состояние пастовой закладочной смеси с приданием ей специальных свойств пасты;
- использование изолирующих материалов (серобетона) для безопасного размещения пастовой закладки на основе хвостов ГМЗ в подземных выработках при непосредственном контакте с работающими людьми.

Выводы

В результате лабораторных исследований найдены принципиальные решения по безопасному размещению текущих и лежащих хвостов ГМЗ в виде твердеющей пастовой закладочной смеси для подземных камер больших размеров (этажно-камерные и подэтажно-камерные системы разработки), а также для заполнения подземного пространства отработанных рудников. Определены основные направления работ по снижению радоновыделения из пастовой закладки, размещенной в подземном пространстве рудников.

В соответствии с вносимыми изменениями в Федеральный закон № 190-ФЗ «Об обращении с РАО» о запрете на размещение вновь образующихся РАО за исключением случаев, когда это действительно обоснованно, создание технологии добычи и переработки урановых руд с замкнутым производственным циклом требует проведения полупромышленных испытаний технологии приготовления твердеющих пастовых закладочных смесей, методов их транспортирования в закладываемые камеры.

Библиографический список

См. англ. блок.

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 7, pp. 73–77
DOI: 10.17580/gzh.2018.07.14

Thickening of uranium ore mill tailings with paste production for underground disposal

Information about authors

E. V. Kuzmin¹, Head of Research Laboratory, Professor, Doctor of Engineering Sciences, EViKuzmin@rosatom.ru

V. S. Svyatetsky², Vice-Chief Executive Officer – Operating Officer

V. V. Markovets³, Head of Radiation Safety Laboratory

¹ VNIPromtekhologii R&D Institute, Moscow, Russia

² "Atomredmetzoloto" JSC, Moscow, Russia

³ Priargunsky Mining and Chemical Works, Krasnokamensk, Russia

Abstract

Over the period of 50 years-long mining and processing of uranium ore, Priargunsky Mining and Chemical Works has accumulated round 75 Mm³ of radioactive waste in surface tailing storages. In this respect, the problem of such waste management was and remains of the highest concern.

The tests on preparation and application of paste backfill made of thickened uranium ore mill tailing in underground mined-out stopes are implemented, the rheological properties and strength of paste backfill with added binders are determined.

There are a number of methods to reduce radon emission from paste backfill. One of the methods consists in addition of a binder which increases density of the backfill mix and, thereby, complicates radon emission. Addition of a few percent of cement unchanges density of radon flow. Fly ash admixture also has no influence on radon flow density. Introduction of 3–10% of barite, the heaviest nonradiating natural material, fails to change radon flow, as well. It is expected to change density of radon flow only in case of considerable increase in quantity of material addition.

Efforts to abate radon emission from paste backfill to underground mine air are suggested. The closed-cycle technology of uranium mining and processing is validated and developed. As a result of the accomplished research, new critical decisions are made on safe disposal of current and old tailings of mining-and-metallurgical works in the form of cemented paste backfill for large stopes (room-and-pillar mining, sublevel stoping) and other kinds of mined-out voids in underground mines.

Keywords: radioactive waste, paste backfill materials, rheological properties, compression strength, radon emission, reduction.

References

- Hou P., Cheng X., Qian J., Zhang R., Cao W., Shah S. P. Characteristics of surface-treatment of nano-SiO₂ on the transport properties of hardened cement pastes with different water-to-cement ratios. *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 55. pp. 26–33.
- Kurumisawa K., Haga K., Hayashi D., Owada H. Effects of calcium leaching on diffusion properties of hardened and altered cement pastes. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2017. Vol. 99. pp. 175–183.
- Hasan A., Suazo G., Fourie A. B. Full scale experiments on the effectiveness of a drainage system for cemented paste backfill. *Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2013. pp. 379–392.
- Svyatetsky V. S. Feasibility of using uranium mill tailings to produce paste backfill at Priargunsky Mining and Chemical Works. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*. 2015. No. 10. pp. 37–40.
- Svyatetsky V. S. Finding shearing stress and strength of paste backfill based on uranium mill tailings. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*. 2015. No. 9. pp. 10–13.
- Construction Regulations SP LKP-91. Sanitary Rules for Closure, Temporary Closing and Conversion of Radioactive Ore Mining and Processing Plants. Moscow, 1991. 27 p.
- Collier N. C., Milestone N. B., Gordon L.E., Ko S.-C. The suitability of a supersulfated cement for nuclear waste immobilization. *Journal of Nuclear Materials*. 2014. Vol. 452, Iss. 1-3. pp. 457–464.
- Kurilenko V. V., Khaikovich I. M. Estimation procedure of eco-geological pollution in a mineral mining area. *Obogashchenie rud*. 2015. No. 3. pp. 56–60. DOI: 10.17580/or.2015.03.10
- Pavlov I. V., Pokrovsky S. S., Kamnev E. N. Methods to Maintain Radiation Safety in Uranium Exploration and Recovery. Moscow : Energoatomizdat, 1994. 256 p.
- Pavlov I. V. Theoretical calculation of radon emission from fractured hard rock mass in mine air. *Subjects of Atomic Science and Technique*. Series: Geology and Mining. 1988. Iss. 2.
- Karamushka V. P., Kamnev E. N., Kuzin R. E. Reclamation of Uranium Ore Mining and Processing Objects. Series: Atomic Energy. Moscow : Gornaya Kniga, 2015. 183 p.
- Ivanov V. G., Kulyshev V. I., Kolesaev V. B., Litvinenko V. G., Sheludchenko V. G., Tirsky A. V. Optimization of Complex-Structure Uranium Ore Deposit Mining. Moscow : Gornaya Kniga, 2007. 265 p.
- Sanitary Rules 2.6.1.2612–10. Basic Sanitary Regulations of Radiation Safety (OSPORB–99/2010) (including Revision 1 as of 16.09.2013). Minzdrav Rossii, 2010. 79 p.
- Svyatetsky V. S., Kuzmin E. V., Starodumov A. V., Velichko D. V. Enclosing rock reinforcement in room and pillar mining in the Streltsovsk uranium ore field. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 2. pp. 32–36. DOI: 10.17580/gzh.2015.02.05
- Mohamed A.-M. O., Maisa El Gamal. Sulfur Concrete for the Construction Industry: A Sustainable Development Approach. J. Ross Publishing, 2010. 448 p.
- King R. B. Encyclopedia of Inorganic Chemistry. 2nd ed. New York : Wiley, 2005. 6655 p.
- Hansen C. M. Solubility Parameters: A User's Handbook. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2007. 519 p.

