

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МАССОПЕРЕНОСА СОЕДИНЕНИЙ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

© Е. А. Салганский, Д. Н. Подлесный, М. В. Цветков, А. Ю. Зайченко

Институт проблем химической физики РАН,
142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр. Академика Семенова, д. 1
E-mail: sea@icp.ac.ru

Поступила в Редакцию 13 апреля 2020 г.

После доработки 25 апреля 2020 г.

Принята к публикации 29 мая 2020 г.

Проведен термодинамический расчет возможности массопереноса соединений металлов в условиях фильтрационного горения металлосодержащих смесей. По результатам расчетов металлы были разделены на две группы: в первую отнесены металлы, которые образуют как конденсированную, так и газообразную фазы, во вторую группу — металлы, которые находятся только в конденсированной фазе. В условиях волны фильтрационного горения вследствие непрерывного испарения и конденсации можно организовать массоперенос соединений металлов первой группы с целью их концентрации в конкретной зоне реактора. Металлы второй группы не участвуют в процессе массопереноса в условиях волны фильтрационного горения и будут оставаться в твердых продуктах сгорания (в золе). Их концентрирование возможно только при наличии большого количества горючего компонента в исходной смеси. В этом случае из-за выгорания горючей части и сохранения соединений металлов в зольном остатке произойдет их концентрирование. Концентрирование металлов позволит осуществить их дальнейшее экономически обоснованное извлечение традиционными методами.

Ключевые слова: *фильтрационное горение; извлечение металлов; массоперенос; редкие и ценные металлы; термодинамические расчеты*

DOI: 10.31857/S004446182007018X

Под редкими металлами обычно понимают группу металлов, которые мало распространены в природе, а извлечение их из сырья связано с большими технологическими трудностями. Тем не менее редкие металлы играют важную роль в научно-техническом развитии. Например, Li, In, Ga, Ge, Mo, W, V являются незаменимыми компонентами высокопроизводительных и востребованных промышленных товаров (таких как жидкокристаллические панели, автомобили, сверхпроводящие катушки и т. д.), поэтому редкие металлы имеют важное значение в стратегическом, научном, промышленном и экономическом плане [1]. Из-за большого спроса на редкие металлы, низкого содержания в земной коре, а также неравномерного залегания в мире существует риск истощения природных источников редких металлов и перебоев их поставок в будущем, что вынуждает промышленность искать альтернативные источники сырья.

В мире проводятся исследования по извлечению ценных металлов из низкосортных руд [2], металлосодержащих отходов, таких как шахтные воды, зола уноса, отработанные растворы и катализаторы, отработанные батареи, шлаки и шламы [3, 4]. Твердые отходы черной и цветной металлургической промышленности (шламы, пыль, шлаки, красные глины и отходы обогащения), представляющие серьезную угрозу для окружающей среды [5], а также ряд бытовых отходов (неисправная электроника и бытовая техника) могут рассматриваться как вторичный ресурс для пиро/гидрометаллургического получения металлов [6, 7]. Каменные угли могут являться источниками стратегически важных элементов, таких как Ge, Ga, U, V, Se, Y, Sc, Nb, Au, Ag и Re, а также неблагородных металлов Al и Mg. Их добыча из угля в обозримом будущем может сделать этот источник экономически привлекательным вариантом, особенно

для основных стран-потребителей угля, таких как Китай, США, Россия, Индия [8].

В настоящее время внедрены различные методы извлечения редких металлов: пирометаллургический, биометаллургический, химический (выщелачивание), которые продолжают развиваться [9, 10]. Основная сложность при извлечении металлов заключается в том, что, как правило, их концентрация в сырье очень низкая, что затрудняет экономическую эффективность традиционных методов извлечения.

Процессы фильтрационного горения металлсодержащих топлив позволяют концентрировать редкие металлы путем массопереноса летучих соединений металлов и (или) за счет выгорания органической части топлива. Под фильтрационным горением понимается распространение волн экзотермического превращения в пористой среде при фильтрации газа [11]. Обычно этот процесс осуществляют в реакторах шахтного типа, в которых твердый горючий материал и газообразный окислитель движутся в противотоке навстречу друг другу [12, 13]. Процесс фильтрационного горения характеризуется высокой энергоэффективностью и устойчивостью к изменениям состава топлива за счет интенсивных процессов внутреннего теплообмена, которые позволяют накапливать тепловую энергию во фронте горения и приводят к образованию зональной структуры [14, 15]. В каждой зоне происходят физико-химические процессы, которые определяются условиями в этой зоне (температура, фазовые свойства, концентрации реагентов и т. д.). В результате возможно как разделение стадий сушки [16], пиролиза и окисления топлива [17] по длине реактора, так и их совместное протекание в одной области. Пространственное разделение зон обеспечивает локализацию определенных веществ в различных зонах в соответствии с их физико-химическими свойствами. Поскольку массоперенос летучих веществ из реакционной смеси сопровождается постоянными процессами испарения и конденсации, в случае массопереноса нескольких продуктов из исходной смеси их можно разделить в зависимости от их летучести, коэффициентов адсорбции и т. д. В результате технологии, основанные на фильтрационном горении, могут быть очень перспективными для извлечения некоторых металлов, особенно тех, которые могут образовывать относительно летучие продукты (как продукты окисления, так и восстановления).

Ранее экспериментально было показано, что возможно селективное концентрирование молибдена в волне фильтрационного горения, когда его исходная концентрация в сырье составляла 0.15 мас% [18]. В работе [19] построена и исследована двухтемпера-

турная одномерная модель фильтрационного горения в адиабатическом конечном реакторе в присутствии металлов. В результате расчетов на примере цинка показано, что при определенных скоростях воздуха и размерах частиц шихты может быть достигнуто полное извлечение металла из реактора. Какой режим горения следует выбирать для осуществления массопереноса того или иного металла, можно предварительно определить по результатам расчета равновесных концентраций продуктов реакции [20]. За счет волны фильтрационного горения при продуве большим объемом газового потока можно осуществить массоперенос распределенного в исходном топливе испаряющегося металла в газ с последующим выделением его известными методами.

Целью работы являлось проведение термодинамических расчетов для определения равновесных продуктов, образующихся в условиях фильтрационного горения металлсодержащих смесей. Данная работа является продолжением работ [19, 20].

Методика термодинамических расчетов

Для теоретического обоснования выбора значений управляющих параметров фильтрационного горения провели термодинамический анализ поведения металлсодержащих систем в условиях волны горения. Анализ провели с помощью программы расчета высокотемпературных термодинамических равновесий TERRA, задавая состав смеси, температурный интервал и давление [21]. В работе [21] на основе законов термодинамики с использованием принципа максимума энтропии построена модель равновесного состояния многокомпонентных гетерогенных систем произвольного состава. Разработанный универсальный алгоритм позволяет рассчитывать фазовый и химический состав рабочих сред химико-технологических, энергетических, металлургических процессов, а также их термодинамические и транспортные свойства.

С помощью расчетов определили наличие в продуктах соединений металлов в газовой или конденсированной фазе. Полагали, что исходная твердая фаза состоит из следующих компонентов: $C + H + \text{металл} + S$. Брутто-формулу углеводородной матрицы приняли $C_1H_{0.5}$ — это близко к формуле многих тяжелых нефтяных остатков. На основе литературных данных проведен анализ содержания стратегически важных металлов в виде примесей в различном сырье: угли, нефтекокс, тяжелые нефтяные остатки, бедные руды, отвалы энергетических предприятий, хвосты обогатительных фабрик. По результатам ана-

лиза определены объекты исследований: Be, Bi, Cd, Co, Cs, Ga, Ge, Hf, In, Li, Nb, Ni, Rb, Sc, Se, Sr, Ta, Te, Ti, Tl, V, W, Y, Yb, Zr. Характеристики газовой фазы принимали равными характеристикам воздуха. Полагали, что азот не вступает в химические реакции в рассматриваемых условиях, поэтому он в расчетах не участвует. Таким образом, рассматриваемая система имеет вид $Me_mC_1H_{0.5}O_xS_y$. Содержание металла в исходной смеси составляло 0.5 мас% от углерода, содержащегося в основной углеводородной матрице. В соответствии с выбранным содержанием рассчитывали параметр m для каждого металла.

При фильтрационном горении в зависимости от содержания твердого горючего в смеси могут формироваться две основные тепловые структуры волны горения — нормальная и инверсная. Нормальная структура реализуется при небольшом содержании твердого горючего в исходной смеси. Она характеризуется быстрым подъемом температуры перед фронтом горения и протяженной высокотемпературной зоной за фронтом с окислительной средой (с высоким содержанием кислорода). Инверсная структура реализуется при высоком содержании твердого горючего в исходной смеси. Она характеризуется протяженной высокотемпературной зоной с восстановительной средой (с высоким содержанием водорода и монооксида углерода) перед фронтом горения и быстрым спадом температуры за фронтом. В связи с этим рассматривали различное содержание кислорода в системе: недостаток кислорода для окисления углерода до монооксида углерода $x = 1$, избыток кислорода для полного окисления углерода и водорода $x = 2.4$ и промежуточный случай $x = 1.7$.

Так как в углях или нефтях может в небольших количествах присутствовать сера, рассматривали два случая: $y = 0$ или $y = 0.01$. Обычно рабочая температура в зоне горения поддерживается на уровне 1300–1500 К, но может быть увеличена и до 1700 К. Поэтому термохимические равновесия рассчитывали для температурного интервала 300–1700 К при давлении 1 атм.

Обсуждение результатов

Результаты расчетов, в которых соединения металла в продуктах помимо твердой присутствуют и в газовой фазе, рассмотрим на примере германия. В случае отсутствия серы исходная смесь имела следующий состав $Ge_{0.000826}C_1H_{0.5}O_x$. На рисунках представлены только соединения, содержащие германий. В восстановительной среде (недостаток кислорода) до температуры 900 К германий находится в форме

конденсированного диоксида германия (рис. 1, *a*). В диапазоне 900–1500 К диоксид германия начинает восстанавливаться до конденсированного германия и газообразного оксида германия. Максимальная концентрация германия в конденсированном виде наблюдается при температуре 900 К. При температурах выше 1500 К весь германий переходит в газообразное состояние, при этом увеличивается содержание германия и снижается содержание его оксида.

При увеличении содержания кислорода германий также находится в форме конденсированного диоксида германия (рис. 1, *б*, кривая 1) до температуры 900 К. Выше этой температуры диоксид германия начинает восстанавливаться и переходит в газообразный оксид германия (рис. 1, *б*, кривая 2). Другие соединения германия в этой системе отсутствуют. В окислительной среде, так же как и в предыдущем случае, в равновесном составе наблюдаются только два соединения германия — конденсированный диоксид (рис. 1, *б*, кривая 3) и газообразный оксид (рис. 1, *б*, кривая 4). Отличительной особенностью этого состава является то, что конденсированный диоксид германия начинает восстанавливаться при температурах выше 1400 К.

При наличии серы исходная смесь имеет состав $Ge_{0.000826}C_1H_{0.5}O_xS_{0.01}$. Присутствие серы изменяет равновесный состав продуктов. В восстановительной среде (рис. 1, *в*) до температуры 800 К германий находится в форме конденсированного диоксида германия (рис. 1, *в*, кривая 1). По сравнению с системой без серы пороговое значение температуры начала восстановления диоксида германия снизилось на 100° (рис. 1, *a*). С увеличением температуры германий переходит в форму газообразного сульфида германия (рис. 1, *в*, кривая 2).

При увеличении содержания кислорода (рис. 1, *г*) как и в предыдущем случае, до температуры 800 К наблюдается только конденсированный диоксид германия (рис. 1, *г*, кривая 1). С увеличением температуры конденсированный диоксид германия переходит в газообразные сульфид (рис. 1, *г*, кривая 2) и оксид германия (рис. 1, *г*, кривая 3). Максимум содержания сульфида германия наблюдается при температуре 820 К, после чего он постепенно снижается, при этом увеличивается содержание оксида германия.

В окислительной среде наличие серы не сказывается на равновесном составе соединений германия, который полностью совпадает с составом на рис. 1, *б*. В равновесном составе наблюдаются только два соединения германия — конденсированный диоксид и газообразный оксид.

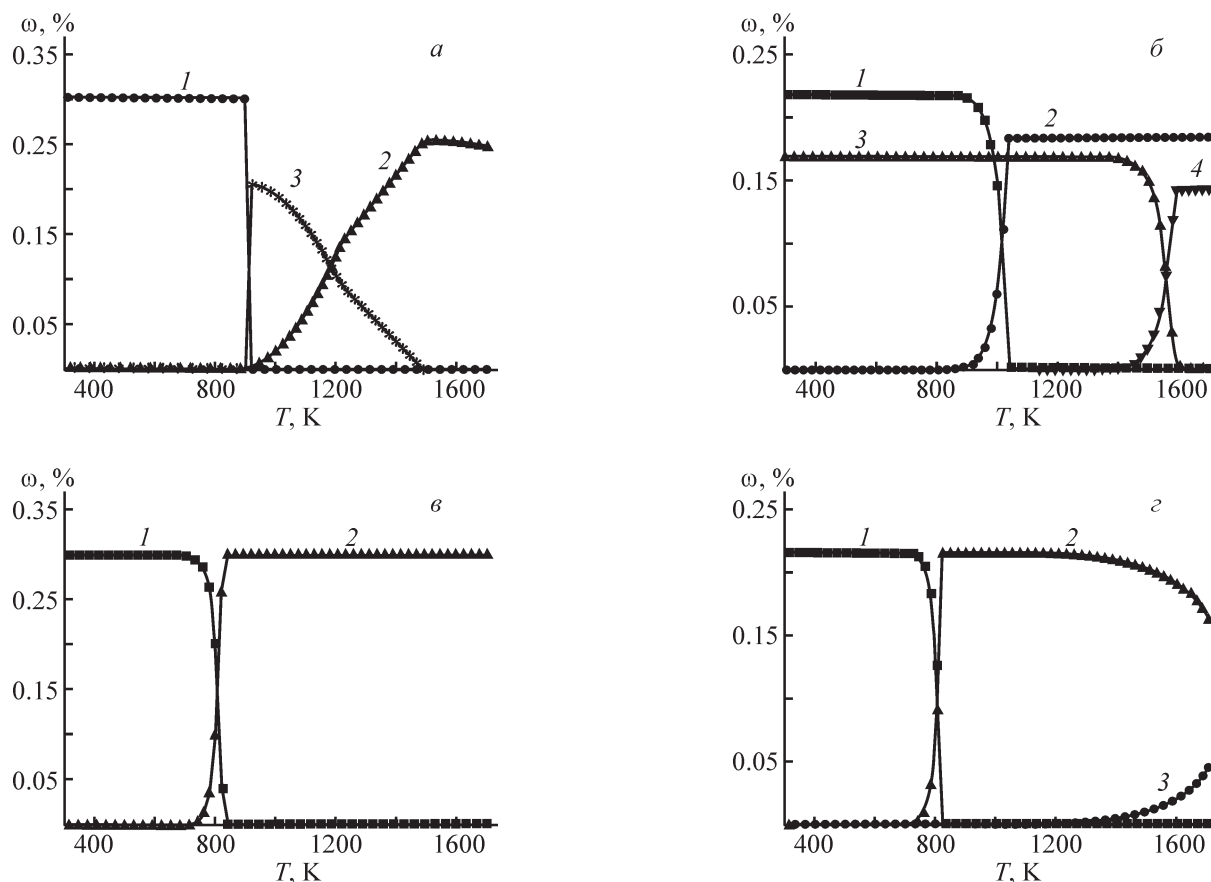


Рис. 1. Зависимость равновесного состава смеси от температуры.

а: 1 — $\text{GeO}_2(\text{c})$, 2 — $\text{GeO}(\text{g})$, 3 — $\text{Ge}(\text{c})$ для системы $\text{Ge}_{0.000826}\text{C}_1\text{H}_{0.5}\text{O}_1$; б: 1, 2 — система $\text{Ge}_{0.000826}\text{C}_1\text{H}_{0.5}\text{O}_{1.7}$; 3, 4 — система $\text{Ge}_{0.000826}\text{C}_1\text{H}_{0.5}\text{O}_{2.4}$; 1, 3 — $\text{GeO}_2(\text{c})$; 2, 4 — $\text{GeO}(\text{g})$; в: 1 — $\text{GeO}_2(\text{c})$, 2 — $\text{GeS}(\text{g})$ для системы $\text{Ge}_{0.000826}\text{C}_1\text{H}_{0.5}\text{O}_{1.7}\text{S}_{0.01}$; г: 1 — $\text{GeO}_2(\text{c})$, 2 — $\text{GeS}(\text{g})$, 3 — $\text{GeO}(\text{g})$ для системы $\text{Ge}_{0.000826}\text{C}_1\text{H}_{0.5}\text{O}_{1.7}\text{S}_{0.01}$.

Индексы: (с) — конденсированная фаза, (г) — газовая фаза.

Аналогичные расчеты были проведены для всех рассматриваемых металлов. По результатам расчетов металлы поделили на две группы: к первой относятся металлы, образующие как конденсированную, так и газообразную фазы в продуктах, и вторая группа — металлы, соединения которых находятся только в конденсированной фазе. К первой группе относятся металлы: Bi, Cd, Cs, Ge, In, Li, Rb, Se, Te, Tl, W. Ко второй группе относятся металлы: Be, Co, Hf, Ga, Nb, Ni, Sc, Sr, Ta, Ti, V, Y, Yb, Zr. Металлы в газовой фазе могут находиться как в виде свободных металлов, так и в виде оксидов, гидроксидов, сульфидов и сульфатов. В рассматриваемых условиях висмут, индий, таллий, селен и теллур могут переходить в газообразное состояние как в виде металла, так и в виде оксидов. Кадмий и литий присутствуют в газовой фазе только в виде металла. Цезий и рубидий могут переходить в газ в виде металла, гидроксида или сульфата. Германий может образовывать монооксид или сульфид германия в газовой фазе. Вольфрам пе-

реходит в газ только в виде триоксида. Соединения металлов этой группы, присутствующие в газовой фазе, в зависимости от исходных значений управляющих параметров процесса фильтрационного горения представлены в таблице.

На примере стронция показано поведение металлов из второй группы, соединения которых в продуктах находятся только в конденсированной фазе в рассматриваемых условиях. Для случая отсутствия в системе серы единственным соединением стронция до температуры 1200 К является карбонат стронция (рис. 2, кривая 1). При повышении температуры карбонат стронция разлагается до оксида стронция (твердая фаза) (рис. 2, кривая 2) и углекислого газа. Присутствие серы изменяет равновесный состав продуктов. В этом случае до температуры 850 К единственным соединением стронция также является его карбонат (рис. 2, кривая 3). Однако при дальнейшем повышении температуры карбонат стронция переходит в сульфид стронция (рис. 2, кривая 4).

Основные соединения металлов, находящиеся в газовой фазе

Металл	Исходная система $Me_mC_1H_{0.5}O_xS_y$					
	$x = 1, y = 0$	$x = 1.7, y = 0$	$x = 2.4, y = 0$	$x = 1, y = 0.01$	$x = 1.7, y = 0.01$	$x = 2.4, y = 0.01$
Bi	Bi	Bi	Bi, BiO	Bi, BiS	Bi, BiS	Bi, BiO
Cd	Cd	Cd	Cd	Cd	Cd	Cd
Cs	Cs, CsOH	Cs, CsOH	CsOH	Cs	Cs ₂ SO ₄	Cs ₂ SO ₄
Ge	Ge, GeO	Ge	Ge	GeS	GeS, GeO	GeO
In	In, In ₂ O	In, In ₂ O	In ₂ O	In, In ₂ O	In, In ₂ O	In ₂ O
Li	Li	—	—	—	—	—
Rb	Rb, RbOH	Rb, RbOH	RbOH	Rb	Rb ₂ SO ₄	Rb ₂ SO ₄
Se	Se	Se, SeO	SeO, SeO ₂	Se	Se, SeO	SeO, SeO ₂
Te	Te	Te	TeO, TeO ₂	Te	Te	TeO, TeO ₂
Tl	Tl	Tl	Tl, Tl ₂ O	Tl	Tl	Tl, Tl ₂ O
W	WO ₃	WO ₃	WO ₃	WO ₃	WO ₃	WO ₃

Металлы из второй группы в волне горения образуют следующие соединения: металлы, оксиды, карбиды, сульфиды и сульфаты металлов. Бериллий, гафний, скандий, иттрий, иттербий и цирконий образуют в волне горения только оксиды. Кобальт и никель могут находиться в конденсированном состоянии в виде металла или оксида. Ниобий и тантал образуют карбид или оксид. Стронций присутствует в виде оксида, карбоната, сульфида или сульфата стронция.

Металлы второй группы и их соединения не участвуют в процессах массопереноса в условиях волны

фильтрационного горения и будут оставаться в твердых продуктах сгорания (в золе). Их концентрирование будет возможно лишь при наличии большого количества горючей составляющей в исходной смеси. В этом случае за счет выгорания горючей части и сохранения соединений металлов в зольном остатке будет происходить их концентрирование.

Выводы

По результатам расчетов металлы поделены на две группы: первая — металлы, образующие как конденсированную, так и газообразную фазы в продуктах, вторая — металлы, находящиеся только в конденсированной фазе.

К первой группе относятся металлы: Bi, Cd, Cs, Ge, In, Li, Rb, Se, Te, Tl, W. В случае наличия соединений металлов в газовой фазе, как правило, это следующие соединения: металлы, оксиды, гидроксиды, сульфиды и сульфаты металлов. В условиях волны фильтрационного горения за счет постоянного испарения и конденсации можно организовать массоперенос соединений металлов первой группы с целью их концентрирования в определенной зоне реактора.

Ко второй группе относятся металлы: Be, Co, Hf, Ga, Nb, Ni, Sc, Sr, Ta, Ti, V, Y, Yb, Zr. Концентрирование металлов из этой группы возможно лишь в зольном остатке при выгорании органической части топлива. Чем выше содержание органической части в исходном топливе, тем выше степень концентрирования металлов в золе. Концентрирование металлов позволит проводить их дальнейшее извлечение традиционными методами.

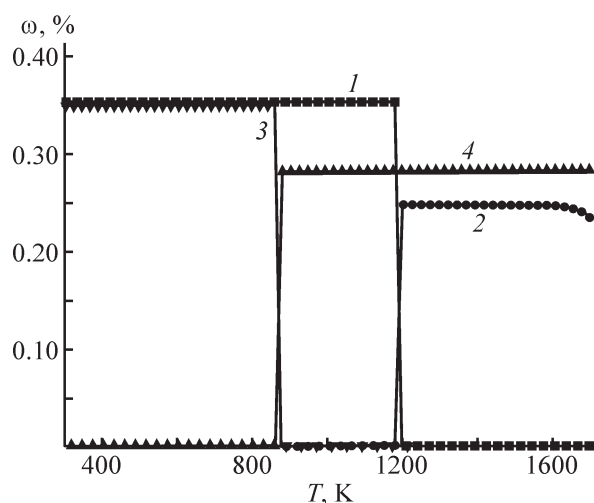


Рис. 2. Зависимость равновесного состава смеси от температуры.

Система: 1, 2 — $Sr_{0.000684}C_1H_{0.5}O_1$,
3, 4 — $Sr_{0.000684}C_1H_{0.5}O_1S_{0.01}$.
1, 3 — $SrCO_3(c)$; 2 — $SrO(c)$; 4 — $SrS(c)$.
Индекс: (c) — конденсированная фаза.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-29-24029-мк и государственного задания № 0089-2019-0018, номер госрегистрации АААА-А19-119-022690098-3.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Салганский Евгений Александрович, д.ф.-м.н.,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0243-9992>

Подлесный Дмитрий Николаевич, к.ф.-м.н.,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3527-324X>

Цветков Максим Вадимович, к.х.н.,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0797-0419>

Зайченко Андрей Юрьевич, к.т.н.,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1237-1995>

Список литературы

- [1] Jowitt S. M., Werner T. T., Weng Z., Mudd G. M. Recycling of the rare earth elements // *Curr. Opin. Green Sustainable Chem.* 2018. V. 13. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.008>
- [2] Anjum F., Shahid M., Akcil A. Biohydrometallurgy techniques of low grade ores: A review on black shale // *Hydrometallurgy*. 2012. V. 117–118. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.01.007>
- [3] Brombacher C., Bachofen R., Brandl H. Biohydrometallurgical processing of solids: A patent review // *Appl. Microbiol. Biot.* 1997. V. 48. N 5. P. 577–587. <https://doi.org/10.1007/s002530051099>
- [4] Sethurajan M., Lens P. N., Horn H. A., Figueiredo L. H. A., van Hullebusch E. D. Leaching and recovery of metals // *Sustainable Heavy Metal Remediation*. 2017. P. 161–206. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61146-4_6
- [5] Sethurajan M., van Hullebusch E. D., Nancharaiyah Y. V. Biotechnology in the management and resource recovery from metal bearing solid wastes: Recent advances // *J. Environ. Manage.* 2018. V. 211. P. 138–153. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.035>
- [6] Akcil A., Erust C., Gahan C. S., Ozgun M., Sahin M., Tuncuk A. Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixivants — A review // *Waste Manag.* 2015. V. 45. P. 258–271. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>
- [7] Lu Y., Xu Z. Precious metals recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspective // *Resour. Conserv. Recy.* 2016. V. 113. P. 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.007>
- [8] Dai S. F., Finkelman R. B. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects // *Int. J. Coal Geol.* 2018. V. 186. P. 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.06.005>
- [9] Hennebel T., Boon N., Maes S., Lenz M. Biotechnologies for critical raw material recovery from primary and secondary sources: R&D priorities and future perspectives // *New Biotech.* 2015. V. 32. N 1. P. 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.08.004>
- [10] Nancharaiyah Y. V., Mohan S. V., Lens P. N. Metals removal and recovery in bioelectrochemical systems: A review // *Bioresour. Technol.* 2015. V. 195. P. 102–114. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.058>
- [11] Lutsenko N. A. Numerical modeling of unsteady gas flow through porous heat-evolutional objects with partial closure of the object's outlet // *Int. J. Heat Mass. Transf.* 2014. V. 72. P. 602–608. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.046>
- [12] Toledo M., Ripoll N., Cespedes J., Zbogar-Rasic A., Fedorova N., Jovicic V., Delgado A. Syngas production from waste tires using a hybrid filtration reactor under different gasifier agents // *Energ. Convers. Manage.* 2018. V. 172. P. 381–390. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.046>
- [13] Салганский Е. А., Фурсов В. П., Глазов С. В., Салганская М. В., Манелис Г. Б. Модель паровоздушной газификации твердого горючего в фильтрационном режиме // *Физика горения и взрыва*. 2006. Т. 42. № 1. С. 65–72 [Salganskii E. A., Fursov V. P., Glazov S. V., Salganskaya M. V., Manelis G. B. Model of vapor-air gasification of a solid fuel in a filtration mode // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2006. V. 42. P. 55–62. <https://doi.org/10.1007/s10573-006-0007-9>]
- [14] Ruiz G., Ripoll N., Fedorova N., Zbogar-Rasic A., Jovicic V., Delgado A., Toledo M. Experimental and numerical analysis of the heat transfer in a packed bed exposed to the high thermal radiation flux // *Int. J. Heat Mass. Transf.* 2019. V. 136. P. 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.009>
- [15] Салганский Е. А., Фурсов В. П., Глазов С. В., Салганская М. В., Манелис Г. Б. Модель воздушной газификации твердого горючего в фильтрационном режиме // *Физика горения и взрыва*. 2003. Т. 39. № 1. С. 44–50 [Salganskii E. A., Fursov V. P., Glazov S. V., Salganskaya M. V., Manelis G. B. Model of air gasification of a solid fuel in a filtration regime // *Combust. Explos. Shock Waves*. 2003. V. 39. N 1. P. 37–42. <https://doi.org/10.1023/A:1022193117840>]

- [16] *Strizhak P. A., Volkov R. S., Castanet G., Lemoine F., Rybdylova O., Sazhin S. S.* // *Int. J. Heat Mass. Transf.* 2018. V. 127. P. 92–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.103>
- [17] *Коротких А. Г., Слюсарский К. В., Дитц А. А.* Исследование кинетики газификации угольного кокса в среде углекислого газа // *Хим. физика.* 2016. Т. 35. № 7. С. 16–22. <https://doi.org/10.7868/S0207401X16070050>
[*Korotkikh A. G., Slyusarskiy K. V., Ditts A. A.* Kinetics of coal char gasification in a carbon dioxide medium // *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2016. V. 10. N 4. P. 576–581. <https://doi.org/10.1134/S1990793116040059>].
- [18] *Manelis G. B., Glazov S. V., Salgansky E. A., Lempert D. B., Gudkova I. Yu., Domashnev I. A., Kolesnikova A. M., Kislov V. M., Kolesnikova Yu. Yu.* Extraction of molybdenum-containing species from heavy oil residues using the filtration combustion method // *Int. J. Heat Mass. Transf.* 2016. V. 92. P. 744–750. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.056>
- [19] *Заславский Г. Е., Лемперт Д. Б., Манелис Г. Б.* Извлечение металлов с помощью процесса фильтрационного горения // *Хим. физика.* 2014. Т. 33. № 1. С. 14–19. <https://doi.org/10.7868/S0207401X14010142>
- [20] *Lempert D. B., Glazov S. V., Manelis G. B.* Mass transfer in filtration combustion processes. InTech: Rijeka, Croatia, 2011. P. 483–498. <https://doi.org/10.5772/14526>
- [21] *Трусов Б. Г.* Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // *Инж. журн.: наука и инновации.* 2012. № 1. С. 240–249. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-1-31>
-