

Оригинальная статья / Original article УДК 669.2:662.8.05

DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-488-497



Генерация цианида натрия путем газификации угля для золотоизвлекательных фабрик

© Н.В. Васюнина*, И.В. Дубова*, С.П. Бакшеев**, М.Р. Ковель*, В.В. Макарова*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия **Частный исследователь, г. Красноярск, Россия

Резюме: Цель - оценка технологической возможности генерации цианида натрия путем газификации угля с изучением влияния параметров процесса (температуры, продолжительности эксперимента, типа угля) на концентрацию цианида натрия в полученных растворах и выявление оптимальных режимов процесса. Эксперименты проводили на лабораторной установке, состоящей из трубчатой печи цилиндрической конструкции с рабочим отсеком в виде корундовой трубы. В качестве объекта исследований были выбраны бурый и древесный угли, предварительно измельченные для увеличения удельной поверхности. Раствор цианида натрия образовывался при сорбции содовым раствором газообразной синильной кислоты как одного из компонентов синтез-газов. В системе поглотителей использовали раствор NaOH (рН = 10), установленный в ледяную баню. Содержание цианида натрия в растворе определялось титриметрическим методом. Для термодинамических расчетов применяли программный комплекс HSC Chemistry 5.1. При проведении газификации древесного угля в диапазоне температур 600-800°C получены растворы цианида натрия с концентрацией 0,03-0,08% масс. Установлено, что с повышением температуры от 600 до 900°C концентрация цианида натрия в щелочном растворе снижается ~ в 4 раза при одинаковой продолжительности эксперимента. Выведено регрессионное уравнение зависимости концентрации NaCN в растворе от температуры газификации угля и продолжительности ведения процесса. Показано, что генерация цианида натрия в лабораторных условиях путем газификации угля позволяет получить концентрации цианида натрия в растворе, соответствующие применяемым на золотоизвлекательных фабриках для проведения цианирования. Внедрение линии генерации цианида натрия непосредственно на производственных площадях золотоизвлекательных фабрик позволит снизить себестоимость производства за счет снижения затрат на закупку, транспортировку и хранение реагентов.

Ключевые слова: газификация угля, выщелачивание, производство цианида натрия, производство золота, цианирование

Для цитирования: Васюнина Н.В., Дубова И.В., Бакшеев С.П., Ковель М.Р., Макарова В.В. Генерация цианида натрия путем газификации угля для золотоизвлекательных фабрик. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2021. Т. 25. № 4. С. 488–497. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-488-497

Generation of sodium cyanide by coal gasification for gold recovery factories

Natalia V. Vasyunina*, Irina V. Dubova*, Sergey P. Baksheev**, Margarita R. Kovel*, Victoria V. Makarova*

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia **Private researcher, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: The aim was to assess the technological feasibility of generating sodium cyanide by coal gasification, to study the effects of the process parameters (temperature, experiment duration, coal type) on the concentration of sodium cyanide in the resulting solutions, as well as to identify optimal modes of the process. Experiments were carried out on a laboratory setup consisting of a tubular cylindrical furnace equipped with a working compartment in the form of a corundum tube. Lignite and charcoal, preliminarily crushed to increase the specific surface area, were investigated. A solution of sodium cyanide was produced by sorption of gaseous hydrocyanic acid (a syngas component) with a sodium carbonate solution. A NaOH solution (pH = 10) installed in an ice bath was used in the system of absorbers. The content of sodium cyanide in the solution was determined by the titrimetric method. The HSC Chemistry 5.1 software package was used for thermodynamic calculations. During the gasification of charcoal in the temperature range 600–800°C, sodium cyanide solutions with a concentration of 0.03–0.08 wt% were obtained. An increase in temperature from 600 to 900°C led to a 4-fold decrease in the concentration of sodium cyanide in an alkaline solution, under the same duration of the

experiments. A regression equation was derived for the dependence of the NaCN concentration in solution on the temperature of coal gasification and the duration of the process. It was shown that the generation of sodium cyanide by coal gasification under laboratory conditions yields sodium cyanide concentrations in solution comparable to those used for gold cyanidation at gold recovery plants. The installation of sodium cyanide generation lines directly at the production areas of gold recovery plants will reduce the production costs by eliminating expenses for purchasing, transporting and storing reagents.

Keywords: coal gasification, leaching, sodium cyanide production, gold production, cyanidation

For citation: Vasyunina NV, Dubova IV, Baksheev SP, Kovel MR, Makarova VV. Generation of sodium cyanide by coal gasification for gold recovery factories. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):488–497. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-488-497

ВВЕДЕНИЕ

Цианирование считается наиболее эффективным методом извлечения золота, используемым в процессе выщелачивания в большинстве технологических схем переработки золотосодержащих руд и концентратов [1, 2]. Извлечение благородных металлов цианированием основано на взаимодействии реагентов с минералами золотосодержащего концентрата, т.е. на свойстве золота и серебра реагировать с цианистым натрием в присутствии кислорода с образованием комплексной соли Na[Au(CN)₂], трудно разлагаемой, но легко растворимой в воде по реакции Эльснера:

$$2Au + 4NaCN + 1/2O_2 + H_2O =$$

= $2Na[Au(CN)_2] + 2NaOH$. (1)

Относительная селективность растворителя, удачное сочетание процессов растворения и осаждения благородных металлов из цианистых растворов (цементация цинковой пылью, сорбция на ионообменных смолах и активированных углях и др.), простота аппаратурного оформления и другие преимущества цианирования делают его весьма эффективным и производительным, обеспечивая возможность применения данной технологии не только к концентратам механического обогащения, но и к рядовым золотым рудам и даже к хвостам обогащения, содержащим 1–2 г/т золота и ниже. Оптимальными условиями процесса цианирования являются следующие: Т:Ж = 1,5:1; концентрация цианида натрия для крепких растворов - 0,030,06%, для слабых –0,003–0,01%; рН промышленных растворов – не ниже 10–10,5 (для поддержания рН добавляют известь в виде 20% раствора); температура раствора – 10–20°C.

Существует множество способов получения цианида натрия, но главным образом его производят путем нейтрализации синильной кислоты водными растворами NaOH или Na₂CO₃. Для производства цианистых солей газообразную синильную кислоту направляют на щелочные абсорберы, представляющие собой небольшие цилиндрические герметизированные аппараты, снабженные барботером с мешалкой и наполненные раствором едкой щелочи. Раствор цианистой соли фильтруется и концентрируется под вакуумом. Выпавшие кристаллы отделяются на центрифугах. Затем соль сушат и упаковывают и отправляют потребителю.

Цианид натрия, как и все цианиды, чрезвычайно ядовит, поэтому существуют особые требования к его транспортировке¹ (для которой требуется специальное разрешение, специальный автотранспорт, неповрежденная тара и упаковка) и хранению (в закрытом вертикальном положении), а также дальнейшему разведению до раствора заданной концентрации [3].

Потребность в цианиде натрия зависит от характера выщелачиваемой руды и составляет 0,25–0,75 кг на 1 т сухой руды [4, 5].

Поэтому актуальным является получение раствора цианида натрия заданной концентрации непосредственно на производственных площадях обогатительных комбинатов.

_

¹ Новая химия. Цианид натрия: свойства, и технология производства [Электронный ресурс]. URL: http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n id=6492. (10.05.2021).



В данной работе для этой цели предлагается использовать синтез-газы, произведенные при газификации угля с получением газообразного HCN конверсией метана с кислородом и аммиаком и дальнейшим синтезом цианида натрия сорбцией HCN содовым раствором (таблица).

Газификация угля — это высокотемпературный физико-химический процесс взаимодействия угля с газами-окислителями (O_2 , H_2O , CO_2 ,) с получением газов H_2 , CO, CH_4 (см. таблицу, уравнения (1)–(5), рис. 1) [6–9]. Состав и теплота сгорания полученного в результате газификации газа различны и зависят от предполагаемых направлений его использования [12, 13]. В результате могут быть получены²:

- горючий газ (для технологического и энергетического сжигания) при наличии большего объема метана и отсутствии нежелательных продуктов полукоксования угля (масла, смолы, фенолы);
- восстановительный газ (в металлургической промышленности) для прямого восстановления железной руды и др.;
 - синтез-газ (химическое сырье для про-

изводства метанола, аммиака, жидкого топлива согласно процесса Фишера-Тропша) при определенном соотношении $CO:H_2$ и $CH_4:H_2$, что достигается подбором условий технологического процесса и выбором состава газифицирующего агента [14–16].

- Как показывает термодинамический анализ данных при равновесных условиях (рис. 2, 3), газификацию угля можно проводить при температурах выше 500°С (с целью получения синтез-газа достаточно температуры 600–800°С, реакции (1)–(3) [17]. Водород синтезируется при горении угля в интервале температур выше 650°С (реакция (1)) [18, 19].
- Синтез метана из СО иСО₂ (реакции (4), (5)) протекает при температурах газов на выходе из установки ниже 600°С, для образования газообразного аммиака требуются еще более низкие температуры (ниже 200–300°С, реакция 6) [14–16]. Синильная кислота образуется при совместном окислении аммиака и метана кислородом воздуха во всем диапазоне температур, также как и цианид натрия, синтезируемый во время хемосорбции синильной кислоты содовым раствором.

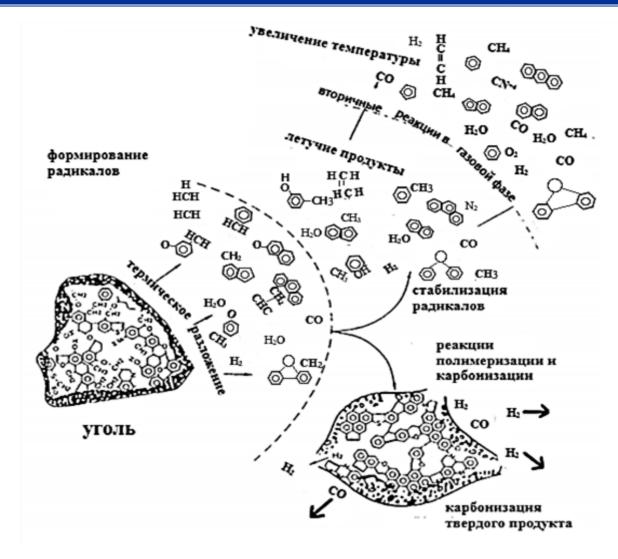
Стадии протекания реакций при генерации цианида натрия Reaction stages at sodium cyanide generation

Стадия	Реакция	№ реакции	Примечание
Газификация угля	$C + H_2O(g) = H_2(g) + CO(g)$	(2)	процесс основан на взаимодействии угля с водяным паром, реакция является эндотермической, равновесие сдвигается вправо, начиная с 923 К
	$2C + O_2(g) = 2CO(g)$	(3)	параллельно с реакцией (2) протекает экзотермическая реакция сгорания угля, которая обеспечивает необходимый тепловой баланс
	$C+CO_2(g) = 2CO(g)$	(4)	реакция будуара, является эндотермической, равновесие сдвигается вправо, начиная с 973 К
Конверсия синтез-газа в метан	$CO_2(g) + 4H_2(g) = CH_4(g) + + 2H_2O(g)$	(5)	равновесие сдвигается вправо при температурах ниже 873 К
	$CO_2(g) + 4H_2(g) = CH_4(g) + + 2H_2O(g)$	(6)	
Образование аммиака	$N_2(g) + 3H_2(g) = 2NH_3(g)$	(7)	равновесие сдвигается вправо при температурах ниже 473 К
Получение синильной кислоты	$2NH_3(g) + 2CH_4(g) + 3O_2(g) =$ = $2HCN(g) + 6H_2O(g)$	(8)	совместное окисление аммиака и метана кислородом воздуха
Получение цианида натрия	HCN(g) + NaOH = = NaCN + H ₂ O	(9)	нейтрализация синильной кислоты щелочью

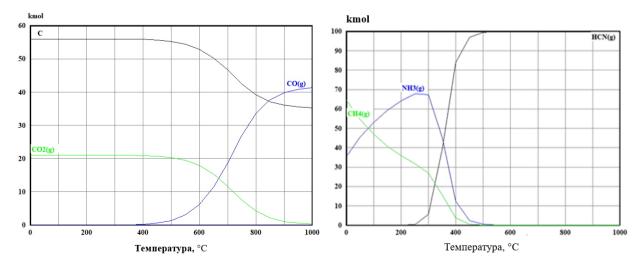
^{*}g – газообразный (от англ. gas).

ВЕСТНИК ИРКУТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА 2021;25(4):488-497

² Нефтегаз. Газификация угля [Электронный ресурс]. URL: https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/147407-vnutritsiklovaya-gazifikatsiya-uglya/. (26.04.2021).



Puc. 1. Разложение угля на молекулы газов при газификации угля Fig. 1. Decomposition of coal into gas molecules at coal gasification



Puc. 2. Влияние температуры горения углерода на состав синтез-газа при газификации угля Fig. 2. Carbon combustion temperature vs synthesis gas composition at coal gasification

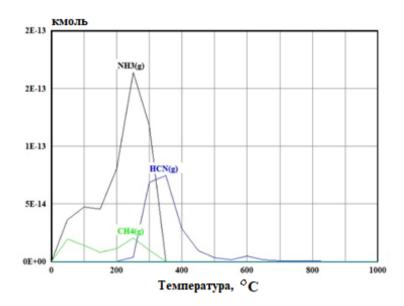


Рис. 3. Влияние температуры отходящих газов на состав синтез-газа при дальнейшей сорбции его содовым раствором

Fig. 3. Waste gas temperature vs synthesis gas composition at its further sorption with a soda solution

При выборе температурного режима стоит учитывать, что эффективность абсорбции увеличивается с понижением температуры абсорбента. Таким образом, газификацию угля необходимо проводить в диапазонах температур выше 600°C, однако с целью синтеза аммиака, метана и целевого продукта их взаимодействия газообразного циановодорода с последующей эффективной абсорбцией необходимо резкое снижение температуры газа на выходе из установки до 200°C проведение сорбции циановодорода холодным щелочным раствором.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ГЕНЕРАЦИИ ЦИАНИДА НАТРИЯ

Лабораторная установка состояла трубчатой печи цилиндрической конструкции 1, корпус которой изготовлен из жаропрочной стали, футерованной теплоизоляционными кирпичами, и гирлянды с поглотителями (рис. 4). Рабочий отсек печи представлял собой корундовую трубу с намотанным вокруг спиральным нагревательным элементом.

Температура в ячейке контролировалась термопарой типа К 4, подключенной к регулятору ОВЕН ТРМ. Перед запуском газификатора в начале каждого эксперимента проводилась предварительная проверка на наличие утечек, герметичность установки и работу системы вентиляции.

Уголь (бурый или древесный, 30-60 г), предварительно измельченный для повышения удельной поверхности, помещался в кварцевую трубку 2. Затем трубка располагалась в печи таким образом, чтобы срединная ее часть трубы, заполненная углем, находилась в камере печи, а края трубки выходили за пределы камеры печи на 10 см. С одного конца трубка герметично закрывалась резиновой пробкой 3, с другого конца – пробкой с газоотводной стеклянной трубкой. Газоотводная трубка через силиконовый шланг соединялась с гирляндой 5, состоящей из двух поглотителей объемом 200 мл и одного каплеуловителя.

Поглотители заполняли раствором NaOH (рН = 10) до 100 мл, гирлянду устанавливали в ледяную баню 6, которая служит охлаждающим элементом для наилучшего эффекта конвертации.

Печь включали и устанавливали заданную температуру регулятором. Образующийся при сгорании угля газ постепенно вытеснялся по системе силиконовых трубок в гирлянду с поглотителями. Постепенно остывая, газ метанизировался и конвертировался в циановодород, который при прохождении через систему поглотителей сорбировался щелочным раствором с образованием NaCN.

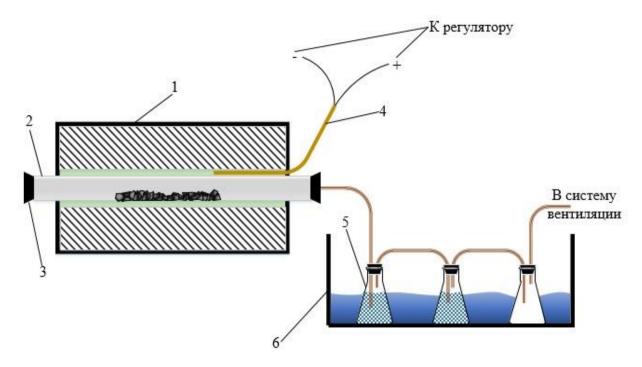


Рис. 4. Схема установки по генерации цианида натрия: 1 – печь; 2 – кварцевая труба с углем; 3 – резиновая пробка; 4 – термопара; 5 – гирлянда с поглотителями и каплеуловителем; 6 – ледяная баня

Fig. 4. Diagram of a sodium cyanide generation plant: 1 – furnace; 2 – quartz pipe with coal; 3 – rubber stopper; 4 – thermocouple; 5 – chain of absorbers and a drop trap; 6 – ice bath

Полученные растворы из поглотителей после окончания эксперимента сливались в сухие стеклянные мерные колбы, герметично закрытые пробкой. Колбы маркировали с указанием наименования продукта, времени отбора пробы и надписью «Осторожно – яд!» и отправлялись на проведение анализа на содержание в растворах цианида натрия. Содержание цианида натрия в растворе определялось методом титрования в соответствии с ГОСТ 8464-79³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Установлено, что с повышением температуры от 600 до 900°С концентрация цианида натрия в щелочном растворе снижается почти в 4 раза при одинаковой продолжительности эксперимента (рис. 5). Полученные концентрации цианида натрия при проведении газификации древесного угля в диапазоне температур 600–800°С 0,03–0,08% масс. соответствуют требуемым концентрациям

цианида натрия в растворе для проведения интенсивного цианирования.

В результате обработки полученных данных по результатам экспериментов было выведено регрессионное уравнение зависимости концентрации цианида натрия в щелочном растворе от температуры газификации угля Т (°C) и продолжительности ведения процесса t (ч):

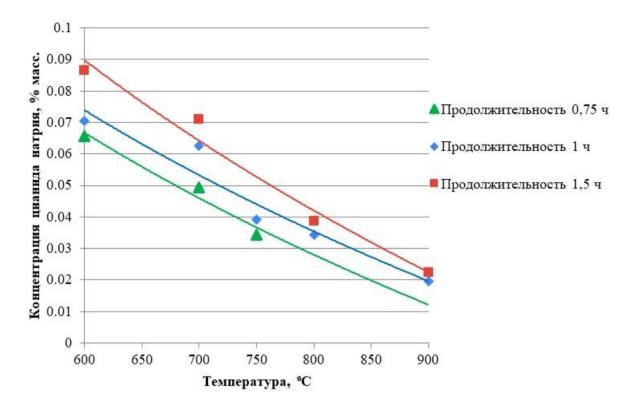
$$C_{NaCN} = 0.171 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0.023 \cdot t.$$

Множественный коэффициент регрессии составляет 0,973. Уравнение корректно в интервале температур от 600–900°С и в пределах продолжительности процесса от 45 мин до 1,5 ч.

Также было отмечено небольшое влияние типа используемого для газификации угля на конечное содержание цианида натрия. Так, при 700°С содержание цианида натрия при газификации бурого угля в течение 1 ч соста-

ВЕСТНИК ИРКУТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА 2021;25(4):488-497

³ГОСТ 8464-79 (ОКП 21 51120100). Натрий цианистый технический. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1979.



Puc. 5. Влияние продолжительности и температуры процесса газификации угля на синтез цианида натрия Fig. 5. Effect of coal gasification duration and temperature on sodium cyanide synthesis

вило 0,04% масс., в то время как при идентичных условиях при газификации древесного угля она составила более 0,06% масс. Это связано с тем, что древесный уголь имеет меньшую зольность, меньше битуминозных летучих веществ, серы и воды, чем бурый уголь. Также древесный уголь имеет большую ВЕТ-поверхность вследствие большого количества капилляров и пор, что подтверждается в работах.

Таким образом, результаты эксперимен-

тов показали, что генерация цианида натрия в лабораторных условиях путем газификации угля позволяет при оптимальных параметрах ведения процесса получить концентрации цианида натрия в растворе, соответствующие применяемым на золотоизвлекательных фабриках для проведения цианирования. В качестве сорбционного оборудования для улавливания компонентов синтез-газа предлагается несколько ступеней газоочистного оборудования, описанного в [20, 21].

Список литературы

- 1. Барченков В.В. Основные технологические процессы переработки золотосодержащих руд. СПб.: Изд-во «Интермедия», 2013. 469 с.
- 2. Syed S. Recovery of gold from secondary sources a review // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 115-116. P. 30–51. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012
- 3. Akcil A., Wu X.Q., Aksay E.K. Coal-gold agglomeration: an alternative separation process in gold recovery // Separation & Purification Reviews. 2009. Vol. 38. Iss. 2. P. 173–201.https://doi.org/10.1080/15422110902855043
- 4. Chugaev L.V., Pleshkov M.A., Markelov A.V. Studying the gold loss structure during cil of carbonaceous concentrate // Tsvetnye Metally. 2020. No. 9. C.34–42. https://doi.org/10.17580/tsm.2020.09.10
- 5. Мусаев В.В., Клюшников А.М., Галимов Р.Р. Оптимизация переработки стойких золотосодержащих руд Каменского месторождения // Проблемы и перспективы эффективности переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения-2019): матер. Междунар. конф. (г. Иркутск, 9–14 сентября 2019 г.). Иркутск: Издво ООО «Репроцентр А1», 2019. С. 283–286.
- 6. Исламов С.Р. Частичная газификация угля. Переработка и обогащение минерального сырья. Т. 5. М.: ООО «Киммерийский центр», 2017. 382 с.
- 7. Higman C., Van Der Burgt M. Gasification. New York: Elsevier Science, 2003. 391 p.
- 8. Журавский Г.И., Савчин В.В. Высокотемпературный термолиз органического сырья // Инженерно-физи-

ческий журнал. 2021. Т. 94. № 3. С. 753-759.

- 9. Сафин Р.Г., Тимербаев Н.Ф., Саттарова З.Г. Технология переработки древесных отходов в генераторный газ: монография. Казань: Изд-во КНИТУ, 2014. 116 с.
- 10. Choudhury H.A., Chakma S., Moholkar V.S. Biomass gasification integrated Fischer-Tropsch synthesis: perspectives, opportunities and challenges // Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass. Chapter 14. Assam: Center for Energy, Indian Institute of Technology Guwahati, 2015. P. 383–435.

https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63289-0.00014-4

- 11. Закоршменный И.М., Кубрин С.С., Янченко Г.А. Расчет показателей материального баланса процесса сжигания угля в подземных условиях при дефиците необходимых исходных данных // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 3. С. 90–99. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-3-90-99
- 12. Донской И.Г. Влияние добавок водяного пара и диоксида углерода на характеристики процесса кислородной газификации пылеугольного топлива // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2021. Т. 21. № 1. С. 21–28. https://doi.org/10.14529/power210102
- 13. Kállay A.A., Vincze V., Nagy G. Two-stage pyrolysis of hungarian brown coal to reduce hydrocarbons within sythesis gas // Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 42. No. 1. P. 59–68.
- 14. Yarkova T.A., Kairbekov Zh.K., Eshova Zh.T., Aubakirov E.A., Kairbekov A.Zh., Gyul'maliev A.M. Thermodynamics of gasification of organic matter of brown coal using oxidants of various compositions // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2017. Vol. 53. lss. 1. P. 45–53. https://doi.org/10.1007/s10553-017-0780-z
- 15. Григорьева Д.М., Жагфаров Ф.Г., Куликова М.В., Гюльмалиев А.М. Термодинамика синтеза углеводородов на основе паровой конверсии метана // Химия и технология топлив и масел. 2018. № 6. С. 28–31.

- 16. Li Bowen, Wang Shuai, Yang Xuesong, Wu Qiang, He Yurong. Thermodynamic evaluation of sorption-enhanced chemical looping gasification with coal as fuel // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. Iss. 41. P. 21186–21194.
- 17. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.205
- 18. Xu Bang, Cao Qingxi, Kuang Dongyang, Gasem K.A.M., Adidharma Hertanto, Ding Dong, Fan Maohong. Kinetics and mechanism of CO_2 gasification of coal catalyzed by Na_2CO_3 , $FeCO_3$ and Na_2CO_3 – $FeCO_3$ // Journal of the Energy Institute. 2020. Vol. 93. Iss.3. P. 922–933. https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.08.004
- 19. Kocer A., Yakal F., Gungor A. Evaluation of greenhouse residues gasification performance in hydrogen production // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. Iss. 36. P. 23244–23249.

https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.110

- 20. Liu Shanke, GuoLiejin, Jin Hui, Li Linhu, Li Guoliang, Yu Lijun. Hydrogen production by supercritical water gasification of coal: a reaction kinetic model including nitrogen and sulfur elements // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. Iss. 56. P. 31732–31744. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.166
- 21. Дружинин К.Е., Немчинова Н.В., Васюнина Н.В. Совершенствование основного и вспомогательного оборудования пирометаллургических процессов и его испытания в условиях действующего производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 5. С. 144–152.

https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-5-144-152

22. Дружинин К.Е., Васюнина Н.В., Немчинова Н.В., Гильманшина Т.Р. Очистка отходящих газов печей спекания с использованием подшламовой воды в качестве газоочистного раствора // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 3. С. 4–9. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-3-4-9

References

- 1. Barchenkov VV. Main technological processes of gold-bearing ore treatment. Saint-Petersburg: Intermediya; 2013, 469 p. (In Russ.)
- 2. Syed S. Recovery of gold from secondary sources a review. *Hydrometallurgy*. 2012;115-116:30–51. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012
- 3. Akcil A, Wu XQ, Aksay EK. Coal-gold agglomeration: an alternative separation process in gold recovery. *Separation & Purification Reviews*. 2009;38(2):173–201. https://doi.org/10.1080/15422110902855043
- 4. Chugaev LV, Pleshkov MA, Markelov AV. Studying the gold loss structure during cil of carbonaceous concentrate. *Tsvetnye Metally*. 2020; 9:34–42. https://doi.org/10.17580/tsm.2020.09.10
- 5. Musaev VV, Klyushnikov AM, Galimov RR. Optimization of resistant gold-bearing ore processing from Kamenskoe deposit. *Problemy i perspektivy effektivnosti pererabotki mineral'nogo syr'ya v 21 veke (Plaksinskie chteniya–2019): materialy Mezhdunarodnoj konferencii = Problems and prospects of effective processing of mineral*

- raw materials in the 21st century (Plaksinsky readings–2019): proceedings of international conference. 9–14 September 2019, Irkutsk. Irkutsk: OOO "Reprocentr A1"; 2019, p. 283–286. (In Russ.)
- 6. Islamov SR. *Partial gasification of coal. Processing and concentration of mineral raw materials.* Vol. 5. Moscow: OOO "Kimmerijskijcentr"; 2017, 382 p.(In Russ.)
- 7. Higman C, Van Der Burgt M. *Gasification*. New York: Elsevier Science; 2003, 391 p.
- 8. ZhuravskiiGI, SavchinVV. High-temperature thermolysis of organic raw materials. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal = Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021;94(3):753–759. (In Russ.)
- 9. Safin RG, Timerbaev NF, Sattarova ZG. *Technology of wood waste processing into a product gas.* Kazan': Kazan National Research Technological University; 2014, 116 p. (In Russ.)
- 10. Choudhury HA, Chakma S, Moholkar VS. Biomass gasification integrated Fischer-Tropsch synthesis: perspectives, opportunities and challenges. In: *Recent Ad-*

Металлургия и материаловедениеMetallurgy and Materials Science



vances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass. Chapter 14. Assam: Center for Energy, Indian Institute of Technology Guwahati; 2015, p. 383–435.

https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63289-0.00014-4

- 11. Zakorshmennyi IM, Kubrin SS, Yanchenko GA. Performance calculation of the material balance of combustion process of coal in underground conditions with a deficit of necessary source data. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal.* 2018;3:90–99. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-3-90-99
- 12. Donskoy IG. How water vapor and carbon dioxide additives affect oxygen gasification of pulverized coal fuel. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering.2021;21(1):21–28. https://doi.org/10.14529/power210102
- 13. Kállay AA, Vincze V, Nagy G. Two-stage pyrolysis of hungarian brown coal to reduce hydrocarbons within sythesis gas. *Materials Science and Engineering*. 2017;42(1):59–68.
- 14. Yarkova TA, Kairbekov ZhK, Eshova ZhT, Aubakirov EA, Kairbekov AZh, Gyul'maliev AM. Thermodynamics of gasification of organic matter of brown coal using oxidants of various compositions. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2017;53(1):45–53. https://doi.org/10.1007/s10553-017-0780-z
- 15. Grigor'eva DM, Zhagfarov FG, Kulikova MV, Gyul'maliev AM. Thermodynamics of hydrocarbon synthesis based on the steam conversion of methane. *Himiya I tekhnologiya topliv i masel* = *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2018;6:28–31. (In Russ.)
- 16. Li Bowen, Wang Shuai, Yang Xuesong, Wu Qiang, He Yurong. Thermodynamic evaluation of sorption-enhanced chemical looping gasification with coal as fuel.

International Journal of Hydrogen Energy. 2020;45(41):21186–21194.

https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.205

- 17. Xu Bang, Cao Qingxi, Kuang Dongyang, Gasem K.A.M., Adidharma Hertanto, Ding Dong, Fan Maohong. Kinetics and mechanism of CO₂ gasification of coal catalyzed by Na₂CO₃, FeCO₃ and Na₂CO₃–FeCO₃. *Journal of the Energy Institute*. 2020;93(3):922–933. https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.08.004
- 18. Kocer A, Yaka IF, Gungor A. Evaluation of green-house residues gasification performance in hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(36):23244–23249.

https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.110

- 19. Liu Shanke, GuoLiejin, Jin Hui, Li Linhu, Li Guoliang, Yu Lijun. Hydrogen production by supercritical water gasification of coal: a reaction kinetic model including nitrogen and sulfur elements. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(56):31732–31744. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.166
- 20. Druzhinin KE, Nemchinova NV, Vasyunina NV. Improving main and auxiliary equipment for pyrometallurgical processes and testing it in production conditions. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2016;5:144–152. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-5-144-152
- 21. Druzhinin K, Vasyunina N, Nemchinova N, Gilmanshina T. Exhaust gases purification of sintering furnaces using under-sludge water as a gas cleaning solution. *Ekologiya I promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2020;24(3):4–9. (In Russ.) https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-3-4-9

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васюнина Наталья Валерьевна,

кандидат технических наук,

доцент кафедры металлургии цветных металлов, Сибирский федеральный университет,

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;

≥ e-mail: NVVasyunina@gmail.com

Дубова Ирина Владимировна,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры фундаментального естественнонаучного образования, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия; e-mail: idubova@mail.ru

Бакшеев Сергей Пантелеймонович,

кандидат технических наук, частный исследователь, e-mail: baksha@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia V. Vasyunina,

Cand. Sci. (Eng.),

Associate Professor of the Department of Metallurgy

of Non-Ferrous Metals,

Siberian Federal University,

79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia;

□ e-mail: NVVasyunina@gmail.com

Irina V. Dubova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Fundamental

Natural Science Education,

Siberian Federal University,

79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia;

e-mail: idubova@mail.ru

Sergey P. Baksheev,

Cand. Sci. (Eng.), Private Researcher, e-mail: baksha@mail.ru Васюнина Н.В., Дубова И.В., Бакшеев С.П. и др. Генерация цианида натрия путем газификации угля ... Vasyunina N.V., Dubova I.V., Baksheev S.P. et al. Generation of sodium cyanide by coal gasification for gold ...

Ковель Маргарита Романовна,

студент,

Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия; e-mail: r.margo07@gmail.com

Макарова Виктория Владимировна,

студент,

Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия; e-mail: 13ikam@gmail.com

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.05.2021; одобрена после рецензирования 12.07.2021; принята к публикации 16.08.2021.

Margarita R. Kovel,

Student,

Siberian Federal University

79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia;

e-mail: r.margo07@gmail.com

Victoria V. Makarova,

Student,

Siberian Federal University,

79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia;

e-mail: 13ikam@gmail.com

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 20.05.2021; approved after reviewing 12.07.2021; accepted for publication 16.08.2021.