

DOI: 10.15593/2224-9400/2017.2.10

УДК 669.881

М.М. Сажина, Н.Ф. Данилов, А.Г. СтаростинПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩИХ
КИСЛЫХ КЕКОВ С СОДОВЫМИ РАСТВОРАМИ**

В содово-кислотной технологии переработки ванадийсодержащих конвертерных шлаков при содержании в шихте для обжига не выше 7–8 % мас. Na_2CO_3 возможно образование в процессе обжига не только метаванадата и пированадата натрия в растворимом состоянии, но и образование пированадата марганца. Другие, кроме ванадия, элементы шлака практически не переходят в щелочно- и кислоторастворимые состояния и не загрязняют образующиеся растворы.

Процессы водного и щелочного выщелачивания представляют собой химическое взаимодействие обожженного шлака (огарка) с водным раствором карбоната натрия, а не простое растворение соединений ванадия, о чем свидетельствуют данные по рассчитанным значениям энергии активации. После кислотного выщелачивания огарка и доотмывки его кислотой кек содержит еще значительные количества ванадия, которые представлены неизвлеченной силикатной формой, гидролизовавшимся продуктом в виде пентаоксида диванадия, а также невыщелаченными соединениями преимущественно пиро- и ортованадатов натрия. Недостатки осуществления кислотного выщелачивания можно уменьшить и даже устранить при проведении промывок кислого кека раствором соды, который взаимодействует как с одной, так и с другой растворимыми формами ванадия в кеке.

В данной статье исследован переход ванадия из твердой фазы в раствор при промывке кека от выщелачивания серной кислотой содовыми растворами с разной начальной концентрацией карбоната натрия, а также в режиме многократной промывки в циркуляционном режиме, т.е. многократного использования содового раствора до предела его срабатываемости, что моделирует промывку кеков в ячейках фильтров на производстве.

С целью изучения элементов механизма процесса содовой доотмывки (выщелачивания) огарков проведены исследования по рентгеноспектральному анализу для определения химического состава, морфологии поверхности и размера частиц обработанного огарка после кислотного и содового выщелачивания.

В результате проведенных исследований реальному производству даны рекомендации по температурным условиям, концентрации используемых растворов карбоната натрия и условиям применения этих растворов на последующих стадиях технологии для улучшения показателей производства.

Ключевые слова: *растворы карбоната натрия, содовое выщелачивание, условия применения, огарок, кеки от обработки кислотой, кеки от обработки содовыми растворами, рентгеноспектральный анализ, элементы механизма.*

M.M. Sazhina, N.F. Danilov, A.G. Starostin

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

INTERACTION BETWEEN VANADIUM-CONTAINING ACID CAKES AND SODIUM SOLUTIONS

In sodium acid technology of vanadium-containing converter slag processing when containing of soda in furnace feed for roasting is less than 7-8 wt-% soluble sodium meta- and pyrovanadates are forming during the roasting. The manganese pyrovanadate formation is also possible. Other elements of slag, except Vanadium, are practically not passing to alkali-soluble and acid-soluble form and don't foul formed solutions.

Processes of alkali leaching and acid leaching are a chemical reaction between roast slag, or cinder, and Na_2CO_3 water solution, not physical dissolving of precipitate. It is shown by calculated values of activation energy. After acid leaching and acid washing a cake contains significant quantity of Vanadium in the form of not reduced silicate modification, hydrolyzed product as divanadium pentoxide and not leaching compounds (mainly sodium ortho- and pyrovanadates). Acid leaching disadvantages may be decreased or even removed when cake after acid leaching is washed by sodium carbonate solution, which interacts with both soluble vanadium forms contained in the cake.

The article considers Vanadium passing from solid phase to solution when the cake resulting from the acid leaching is washing by sodium carbonate solutions with different initial Na_2CO_3 concentrations. The conditions of multistage washing in circulating regime, in other words, the repeated using of sodium carbonate solution to the limit of it's working capacity that simulate the cake washing on filter cells in the workplace are also reviewed.

The cinder after acid and alkali leaching was examined with X-Ray diffraction analyses to identify the chemical composition, the surface morphology and the size of particles of the cinder to study details of sodium washing process mechanism.

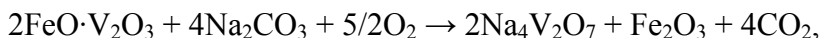
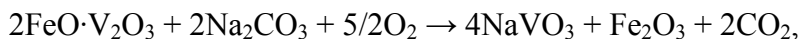
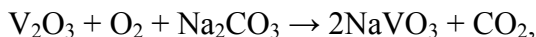
Based on results of researching recommendations for existing industry such as temperature conditions, concentration of using sodium carbonate solutions and conditions of these solutions using at following stages of technology to improve technological characteristics were done.

Keywords: *sodium carbonate solutions, sodium leaching, conditions of using, cinder, cakes after acid treatment, cakes after sodium carbonate solutions treatment, X-Ray diffraction analyses, details of mechanism.*

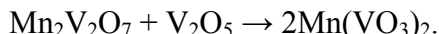
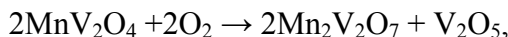
Исследования механизмов, скорости взаимодействия воды и щелочи и состояния ванадия в растворах; комплексообразования, состояния поверхности огарков, фрактальных процессов выщелачивания рассмотрены в работах [1–9].

В процессе переработки ванадийсодержащих шлаков НТМК по модифицированной содовой технологии [10] после окислительно-натрирующего обжига материалов проводят слабокислотное выщелачивание огарка с получением кислых кеков. Указанные кеки иногда имеют достаточно большое остаточное содержание ванадия (3–5 мас. % V_2O_5), и эти кеки необходимо дополнительно обрабатывать с целью доизвлечения ванадия и исправления результатов отклонения от оптимального технологического режима в ходе указанных выше операций.

При обжиге шлакосодовой шихты с содержанием 7–8 % соды при $T > 800$ °C протекают следующие реакции [11]:

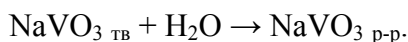


При меньшем содержании соды или полностью без нее при обжиге протекает реакция окисления:

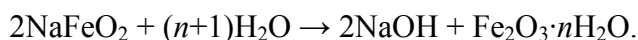
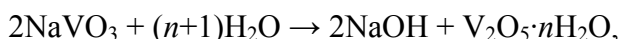


Процесс выщелачивания огарка (продуктов обжига шихты) является типичным диффузионным процессом, протекающем в системе твердое тело–жидкость.

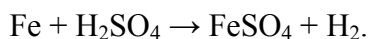
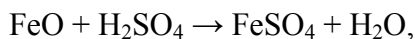
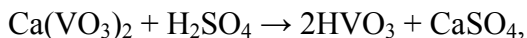
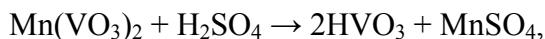
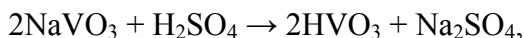
При водном выщелачивании протекают следующие основные физико-химические процессы:



Процесс растворения сопровождается гидролизом продуктов обжига:

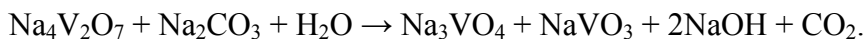
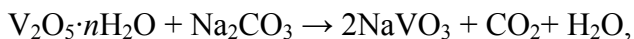


При кислотном выщелачивании процесс взаимодействия кислоторастворимых соединений ванадия является экзотермичным с протеканием следующих реакций:



Таким образом, кек после сернокислотного выщелачивания содержит обычно недоизвлеченный мета- и пированадат натрия, мета- и пированадат марганца, сульфат кальция, невскрывшиеся соединения титана, кремния, оксиды железа, ванадаты железа и хрома и гидролизовавшуюся пятиокись ванадия.

При выщелачивании (промывке) этого кека содовым раствором протекают следующие процессы: образуется метаванадат натрия и пированадаты натрия и марганца; пированадат натрия переходит в ортованадат (мета- и ортованадат – растворимые соединения, пированадат марганца нерастворим в воде и щелочи, растворим только в кислоте):



Ранее было показано, что процесс взаимодействия огарка с водой протекает с высокой энергией активации [12] и является сложным процессом химического взаимодействия раствора с реагирующим ядром твердых частиц. Выщелачивание обожженного без добавок шлака с 5%-ным раствором соды предложено в патенте [13]. В работе [14] предполагается использование соды как на стадии обжига шихты, так и на стадии выщелачивания.

Целью работы явилось изучение выщелачивания обожженных огарков содовым раствором и оценка доизвлечения ванадия после сернокислотных выщелачивания и промывки.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В ходе экспериментов по выщелачиванию огарка содовыми растворами на предваряющей стадии обжига использовался шлак с содержанием V_2O_5 – 14,21 мас. %, MnO – 7 мас. %. Фракция шлака $\leq 0,315$ мм промышленного измельчения. Обжиг проводился при 780–790 °С и соотношении $Na_2O:V_2O_5 = 1:1$ в течение 3 ч. Выщелачивание осуществлялось при соотношении Т:Ж = 1:5 3%-ным раствором соды в течение 15 мин при различных температурах на установке, включающей в себя реакционную емкость с перемешивающим устройством, помещенную в термостат. Скорость перемешивания – 15 об/с ($Re \geq 10000$).

Анализ проб кеков и растворов проводился согласно принятой на заводе «Методике количественного химического анализа» (НДП МХ-115-48–2006 с изм. от 2011 г.), а также с использованием методик источника [15].

Зависимость содержания ванадия в растворе (C , г/дм³) после выщелачивания от продолжительности процесса изображена на рис. 1.

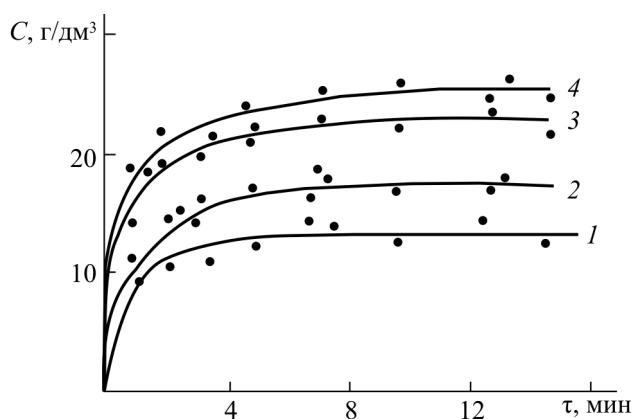


Рис. 1. Агитационное выщелачивание обожженного шлака содовыми растворами при температуре: 1 – 42 °С; 2 – 58 °С; 3 – 76 °С; 4 – 87 °С

Результаты анализа твердой фазы представлены в табл. 1.

Из представленных на рис. 1 данных видно, что особенностью агитационного выщелачивания является относительно быстрое нара-

тание концентрации ванадия в растворе в начальный период времени (4 мин) и относительное постоянство его содержания после 10–15 мин.

Таблица 1

Содержание V_2O_5 в кеке после агитационного выщелачивания содовым раствором

Температура, °С	V_2O_5 общ., мас. %	V_2O_5 с/р, мас. %
42	6,49	4,10
58	5,80	4,70
76	5,50	2,90
87	4,50	2,45

Примечание. V_2O_5 общ. – общее содержание соединений ванадия; V_2O_5 с/р – содержание суммарнорастворимых (водо- и кислоторастворимых) соединений ванадия.

Обработка экспериментальных кривых рис. 1 была проведена по уравнению

$$\Phi(x) = \frac{1}{6} \ln \frac{(1+x)^2}{1+x+x^2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2x-1}{\sqrt{3}},$$

где $x = \frac{C_\tau}{C_n}$; C_τ – концентрация реагента, соответствующая времени τ , кг/м³; C_n – начальная концентрация реагента, кг/м³.

Обработка результатов показала, что между $\Phi(x)$ и τ существует линейная зависимость (рис. 2), что подтверждает диффузионный механизм выщелачивания и позволяет оценить коэффициенты массоотдачи K .

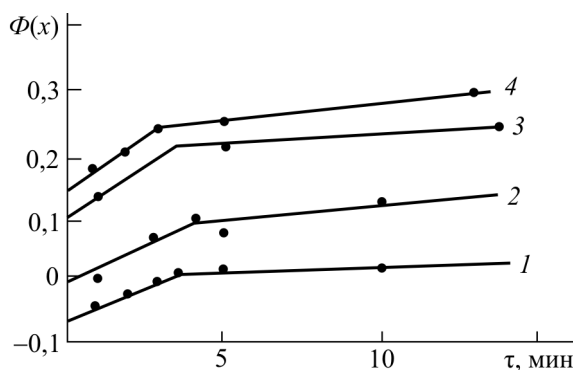


Рис. 2. Обработка экспериментальных кривых агитационного выщелачивания обожженного шлака содовыми растворами при температуре: 1 – 42 °С; 2 – 58 °С; 3 – 76 °С; 4 – 87 °С

По данным рис. 2 явно наблюдается резкий излом, соответствующий продолжительности 3–5 мин, который позволяет предположить существование двух областей протекания процесса. Для начального периода: $\lg K = -5,1 - 541/T$, $E_{\text{акт}} = 10,3$ кДж/моль; для периода 5–15 мин: $\lg K = -4,9 - 870/T$, $E_{\text{акт}} = 16,6$ кДж/моль.

Предположительно первый период связан с выщелачиванием поверхностных скоплений ванадата натрия, а второй период с выщелачиванием внутренних зон, находящихся в глубине частицы огарка.

В ходе экспериментов по доотмывке содовым раствором кека после кислотного выщелачивания и промывки кислотой на предваряющей стадии обжига использовался шлак с содержанием (мас. % в пересчете на оксиды металлов): V_2O_5 общ. – 22,34; MnO – 11,0; FeO – 31,32; Cr_2O_3 – 3,25; TiO_2 – 8,86; CaO – 1,80; SiO_2 – 16,0; Fe мет. – 4,9.

Условия осуществления предшествующих стадий обработки кека: обжиг при 925 °С и соотношении $Na_2O:V_2O_5=0,5:1$ в течение 4 ч; рН-ное сернокислотное выщелачивание 3%-ной H_2SO_4 в течение 15 мин при 50 °С и соотношении Т:Ж = 1:10, кислотная промывка не проводилась. Условия содовой промывки: Т:Ж = 1:10, $T = 55$ °С, продолжительность промывки 15 мин. Опыты проведены при различной начальной концентрации содового раствора (1–5 мас. %). Результаты содовой промывки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Содержание соединений ванадия в жидкой и твердой фазах при различной начальной концентрации соды в промывном растворе

Концентрация раствора Na_2CO_3 , мас. %	Содержание V_2O_5 в/р в фильтрате, г/л	Содержание V_2O_5 общ. в кеке, мас. %	Содержание V_2O_5 общ. в кеке до промывки, мас. %	Изменение содержания V_2O_5 общ, мас. %
1	9,89	5,27	11,29	6,02
2	10,00	5,04	11,29	6,25
3	9,70	4,36	11,29	6,93
5	9,97	3,91	11,29	7,38

Из представленных данных видно, что концентрация содового раствора мало влияет на содержание V_2O_5 в промытом содой кеке, что косвенно говорит о внутридиффузионном торможении процесса.

В случае многократного (до 6 раз) использования содового раствора для доотмывки исследованных образцов исходного кека происходит накопление V_2O_5 в/р в содовом растворе. Условия осуществления предше-

ствующих стадий обработки кека: обжиг при 875 °С и соотношении $\text{Na}_2\text{O}:\text{V}_2\text{O}_5=0,6:1$ в течение 2 ч; рН-ное (предварительное) сернокислотное выщелачивание 1%-ной H_2SO_4 в течение 15 мин при 55 °С и соотношении Т:Ж = 1:10, кислотная промывка 3%-ной H_2SO_4 в течение 15 мин при 55 °С и Т:Ж = 1:10. Условия содовой промывки: Т:Ж = 1:10, $T = 55$ °С, продолжительность промывки 15 мин, начальная концентрация содового раствора – 5 мас. % Na_2CO_3 . Промывке подвергались образцы одного и того же кека (на каждую новую промывку брали новую порцию кека).

Содержание V_2O_5 в/р в фильтрате при 1 промывке образцов одного кека – 2,96 г/л, при 3 промывках – 9,66 г/л, при 6 – 13,87 г/л.

Другие результаты содовых доотмывок представлены в табл. 3. Условия осуществления предшествующих стадий обработки кека: обжиг при 925 °С и соотношении $\text{Na}_2\text{O}:\text{V}_2\text{O}_5=0,5:1$ в течение 2 ч; рН-ное сернокислотное выщелачивание 1–2%-ной H_2SO_4 в течение 15 мин при 40–55 °С и соотношении Т:Ж = 1:10, кислотная промывка 3–5%-ной H_2SO_4 в течение 15 мин при 55 °С и соотношении Т:Ж = 1:5. Условия содовой промывки: Т:Ж = 1:10, $T = 55$ °С, продолжительность промывки 15 мин. Опыты проведены при различной начальной концентрации содового раствора (1–5 мас. %).

Таблица 3

Содержание соединений ванадия в жидкой и твердой фазах
при различной начальной концентрации содового раствора
для различных образцов кека

Концентрация раствора Na_2CO_3 , мас. %	Содержание V_2O_5 в/р в фильтрате, г/л	Содержание V_2O_5 с/р в кеке, мас. %	Содержание V_2O_5 с/р в кеке до промывки, мас. %	Изменение содержания V_2O_5 с/р, мас. %	Содержание V_2O_5 общ. в кеке, мас. %	Содержание V_2O_5 общ. в кеке до промывки, мас. %	Изменение содержания V_2O_5 общ., мас. %
1	4,09	1,95	7,51	5,56	2,50	8,24	5,74
2	3,60	1,07	8,09	7,02	2,18	8,68	6,50
3	3,52	1,26	7,80	6,54	2,82	10,69	7,87
5	5,72	1,35	10,84	9,49	2,91	11,95	9,04
5	9,09	0,61	8,78	8,17	1,00	9,49	8,49
5	12,05	0,45	12,09	11,64	3,36	13,30	9,94

Условия осуществления предшествующих стадий разные, а результаты содовых промывок, приведенных в табл. 3, показывают, что тенденция на улучшение результатов промывки такая же, как и в табл. 2: с ростом концентрации содового раствора растет количество отмытого ванадия.

Для выявления элементов механизма и остаточного состава фаз, а также наличия соединений ванадия в выщелоченном и отмытом кислотой и содовым раствором кеке проведен микроскопический и рентгеноспектральный анализы одного из кеков (обжиг при 925 °С и соотношении $\text{Na}_2\text{O}:\text{V}_2\text{O}_5=0,5:1$ в течение 2 ч; рН-ное сернокислотное выщелачивание 2%-ной H_2SO_4 в течение 15 мин при 40 °С и соотношении Т:Ж = 1:10, кислотная промывка 3%-ной H_2SO_4 в течение 15 мин при 55 °С и соотношении Т:Ж = 1:5, содовая промывка 5%-ным раствором Na_2CO_3 в течение 15 мин при 55 °С и соотношении Т:Ж = 1:10). Анализ проводился на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S3400-N с приставкой Bruker для рентгеноспектрального анализа, позволяющего определять химический состав проб по элементам, а также изучить поверхность и размер частиц.

В качестве примера на рис. 3–6 представлены фотографии и результаты рентгеноспектрального анализа образца после выщелачивания и промывок огарка.

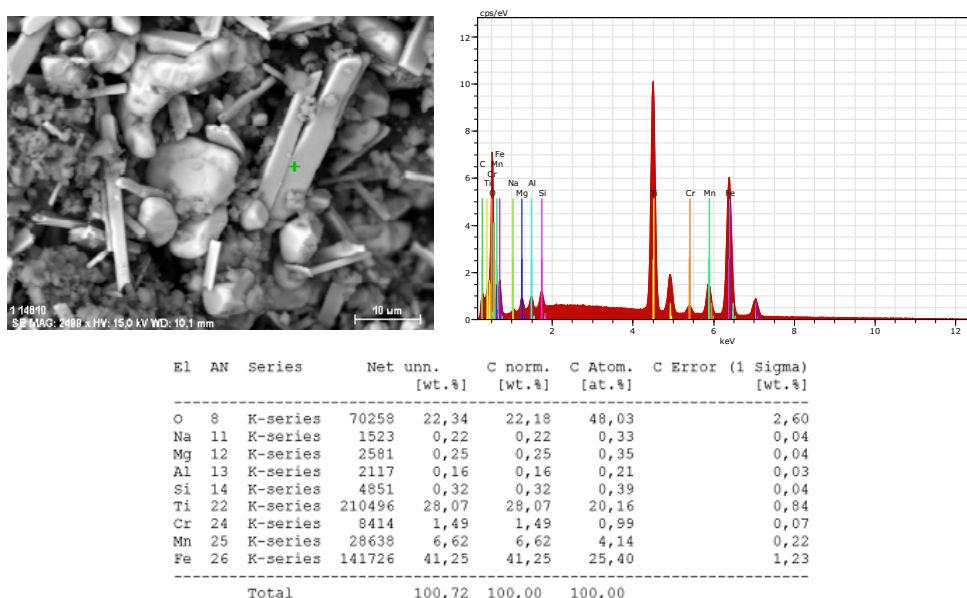


Рис. 3. Микрофотография и спектрограмма с указанием состава по элементам (данные рентгеноспектрального анализа частиц кека в точке), увеличение 2499×

Обработка данных показала, что на рис. 3 представлена хорошо выраженная фаза оксидов железа, титана и марганца, предположительно оксидная фаза Fe_2TiO_5 , не вскрывшиеся при обжиге, выщелачивании и промывке, ванадиевые соединения отсутствуют.

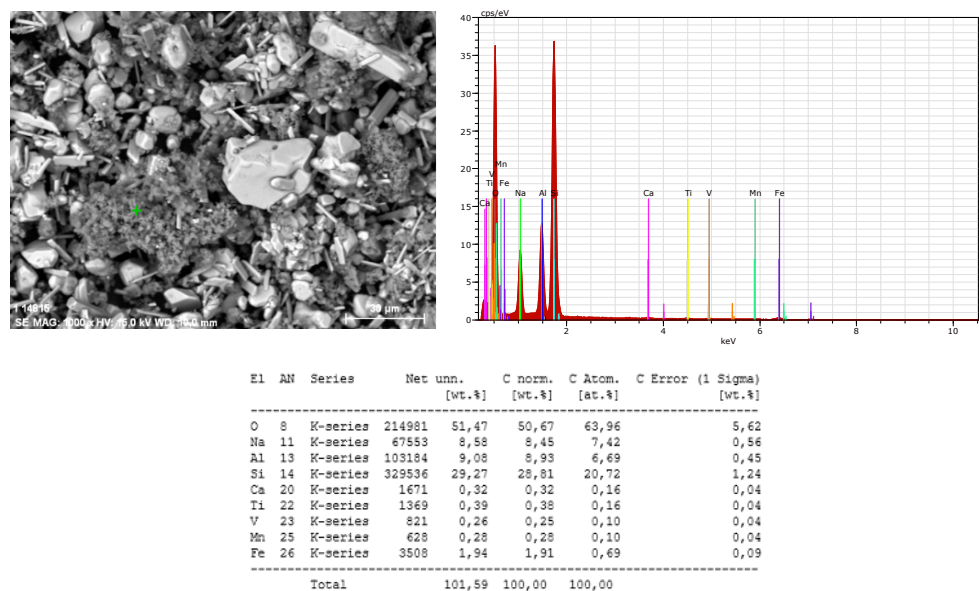


Рис. 4. Микрофотография и спектрограмма с указанием состава по элементам (данные рентгеноспектрального анализа частиц кека в точке), увеличение 1000×

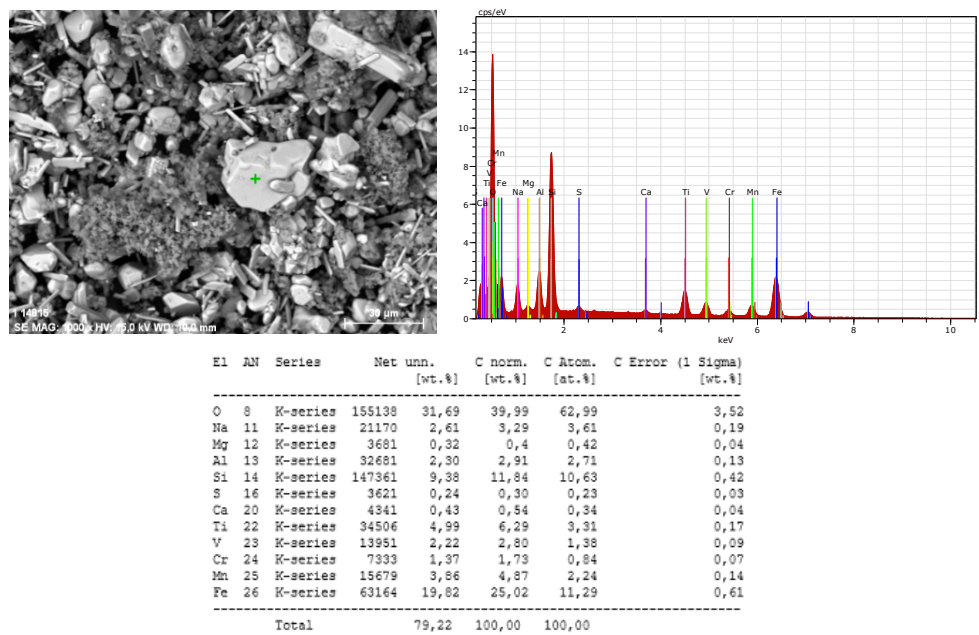


Рис. 5. Микрофотография и спектрограмма с указанием состава по элементам (данные рентгеноспектрального анализа частиц кека в точке), увеличение 1000×

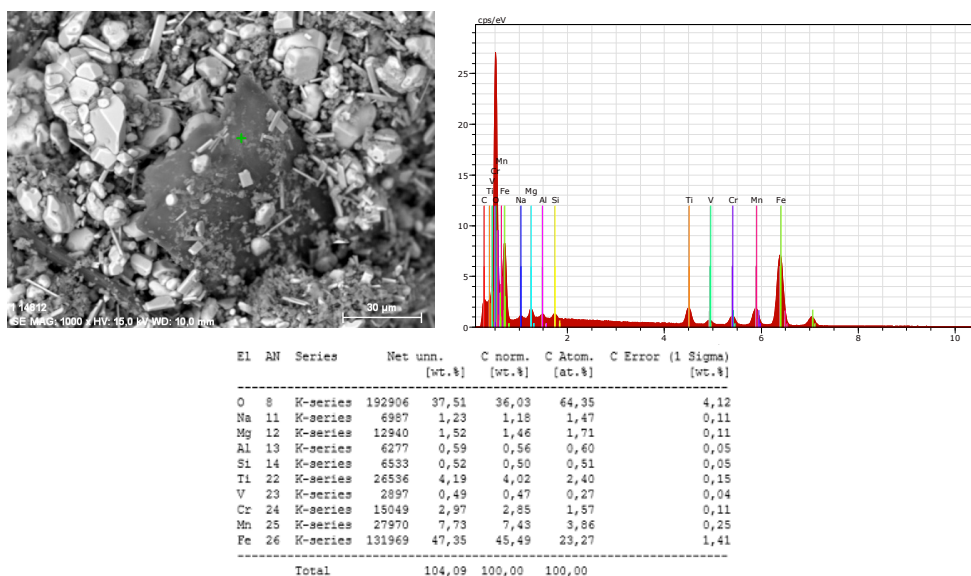


Рис. 6. Микрофотография и спектрограмма с указанием состава по элементам (данные рентгеноспектрального анализа частиц кека в точке), увеличение 1000×

На рис. 4 обнаруживаются оксиды железа, марганца, титана и кремния, а также оставшиеся невыщелоченными и нескрытыми пированадат марганца, ортованадат натрия, на рис. 5 обнаружена преимущественно фаза силикатов натрия и кальция, на рис. 6 – преимущественно оксиды марганца, железа, титана, а также небольшие количества хрома и ванадия, предположительно сложный твердый раствор $\text{Fe}_{2-2x-2y-2z}\text{Mn}_{2x}\text{Cr}_{2y}\text{Al}_{2z}\text{O}_5$ ($x, y, z = 0-0,66$).

Сформировавшейся отдельной фазы V_2O_5 не обнаружено, что говорит о ее полном растворении в процессе содовой промывки. Пиро- и ортованадаты обнаруживались при проведении процесса обжига и кислотного выщелачивания в неоптимальных условиях.

Рекомендуемые оптимальные условия содовой промывки кека:

1. Концентрация содового раствора до 5 мас. % Na_2CO_3 .
2. Температура промывки – 55 °C.
3. Продолжительность промывки не более 15 мин.
4. Количество циклов промывки – до срабатывания остаточного содержания соды в растворе до 2 %.

Список литературы

1. Ивакин А.А., Фотиев А.А. Химия пентавалентного ванадия в водных растворах // Труды Института химии УФАН СССР. – Свердловск, 1971. – 192 с.

2. Сидельникова Э.Г. Исследование процессов обжига и выщелачивания содовой технологии технической пятиокиси ванадия: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1974. – С. 63–72.
3. Шлефер Г.А. Комплексообразование в растворах. – М.: Химия, 1964. – 379 с.
4. Ермаков М.Т., Батракова Л.Х., Козлов В.А. Фрактальный анализ процессов выщелачивания из твердых продуктов сложного состава // Химия, технология и применение ванадия: докл. VIII Всерос. конф. – Чусовой, 2000. – С. 140–143.
5. Амирова С.А., Куценко С.А., Сидельникова Э.Г. Исследование процессов обжига и выщелачивания по содовой технологии переработки шлаков // Тез. докл. II Всесоюз. совещ. по химии, технологии и применению ванадиевых соединений. – Алма-Ата, 1976. – С. 30–31.
6. Ивакин А.А. Состояние и перспективы исследований в области химии соединений ванадия (V) в водных растворах // Материалы I Всесоюз. совещ. по химии, технологии и применению соединений ванадия. – Пермь: Перм. кн. изд-во, 1974. – С. 15–18.
7. Оптимизация выщелачивания ванадия из обожженных конвертерных шлаков / В.Г. Добош [и др.] // Производство ферросплавов: науч. тр. НИИМ. – Челябинск, 1992. – № 18. – С. 100–106.
8. Влияние температуры и продолжительности процесса обработки пульпы обожженной ванадиевой шихты на степень извлечения ванадия в растворы / Е.А. Азис [и др.] // Производство ферросплавов: науч. тр. НИИМ. – Челябинск, 1992. – № 18. – С. 97–100.
9. Комплексная переработка ванадиевого сырья / В.Г. Мизин [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2005. – С. 131–232.
10. Способ переработки ванадийсодержащих конвертерных шлаков: пат. 2230128 Рос. Федерация: МПК C22B34/22 / Данилов Н.Ф., Вдовин В.В., Карпов А.А., Каменских А.А., Кудряшов В.П. – № 2003109343/02; заявл. 03.04.2003; опубл. 10.06.2004, Бюл. №16. – 5 с.
11. Амирова С.А. Технология извлечения ванадия из конвертерных ванадиевых шлаков: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1997. – 90 с.
12. Интенсификация процесса выщелачивания обожженных ванадиевых шихт. Комплексная переработка минерального сырья методами щелочной металлургии / С.А. Амирова, Н.Ф. Данилов, В.В. Ившин, Г.А. Симонова // Тез. докл. III Республ. конф. – Алма-Ата, 1987. – С. 78–79.

13. Process for the extraction of vanadium from vanadium-containing raw materials: patent 3536495 DE, IPC C22B34/22. / Haehn Reinhard DIPL ING DR ING, Sattelberger Siegfried DR ING, Fichte Rudolf DR ING, Retelsdorf Hans-Joachim DR ING.–16.04.1987.

14. Амирова С.А., Кремнева О.Г. Химия, технология и применение ванадиевых соединений // Тез. докл. IV совещ. – Свердловск, 1982.– С. 123.

15. Аналитическая химия ванадия / В.Н. Музгин, Л.Б. Хамзина, В.Л. Золотавин, И.Я. Безруков. – М.: Наука, 1981. – 216 с.

References

1. Ivakin A.A., Fotiev A.A. Khimiia piativalentnogo vanadiia v vodnykh rastvorakh [Chemistry of pentavalent Vanadium in water solutions]. *Trudy Instituta khimii Ural'skogo filiala akademii nauk Soiuza Sovetskikh Sotsialisticheskikh Respublik*. Sverdlovsk, Ural'skii filial akademii nauk Soiuza Sovetskikh Sotsialisticheskikh Respublik, 1971, 192 p.

2. Sidel'nikova E.G. Issledovanie protsessov obzhiga i vyshchelachivaniia sodovoi tekhnologii tekhnicheskoi piatiokisi vanadiia [The study of commercial vanadium pentoxide sodium technology roasting and leaching]. Ph. D. thesis. Perm', 1974, pp. 63-72.

3. Shlefer G.A. Kompleksoobrazovanie v rastvorakh [Complex formation in solutions]. Moscow, Khimiia, 1964, 379 p.

4. Ermekov M.T., Batrakova L.Kh., Kozlov V.A. Fraktal'nyi analiz protsessov vyshchelachivaniia iz tverdykh produktov slozhnogo sostava [Fractal analysis of leaching processes from complex composition solids]. *Khimiia, tekhnologiya i primeneniye vanadiia: doklady VIII Vserossiiskoi konferentsii*. Chusovoi, 2000, pp. 140-143.

5. Amirova S.A., Kutsenko S.A., Sidel'nikova E.G. Issledovanie protsessov obzhiga i vyshchelachivaniia po sodovoi tekhnologii pererabotki shlakov [The study of roasting and leaching processes in slag processing sodium technology]. *Tezisy dokladov II Vsesoiuznogo soveshchaniia po khimii, tekhnologii i primeneniui vanadievnykh soedinenii*. Alma-Ata, 1976, pp. 30-31.

6. Ivakin A.A. Sostoianie i perspektivy issledovaniia v oblasti khimii soedinenii vanadiia (V) v vodnykh rastvorakh [Circumstance and perspective of researches in the field of Vanadium (V) compounds chemistry in water solutions]. *Materialy I Vsesoiuznogo soveshchaniia po khimii, tekhnologii i primeneniui soedinenii vanadiia*. Perm', Permskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1974, pp. 15-18.

7. Dobosh V.G. et al. Optimizatsiia vyshchelachivaniia vanadiia iz obozhzhennykh konverternykh shlakov [Optimization of vanadium leaching from a roasted converter slag]. *Proizvodstvo ferrosplavov: nauchnye trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta metallurgii*. Cheliabinsk, 1992, no. 18, pp. 100-106.

8. Azis E.A. et al. Vliianie temperatury i prodolzhitel'nosti protsessa obrabotki pul'py obozhzhennoi vanadievoi shikhty na stepen' izvlecheniia vanadiia v rastvory [Influence of temperature and time period of roasted vanadium furnace feed pulp treatment process on vanadium extraction degree into solutions]. *Proizvodstvo ferrosplavov: nauchnye trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta metallurgii*. Cheliabinsk, 1992, no. 18, pp. 97-100.

9. Mizin V.G. et al. Kompleksnaia pererabotka vanadievogo syr'ia [Complex processing of vanadium raw material]. Ekaterinburg, Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 2005, pp. 131-232.

10. Danilov N.F., Vdovin V.V., Karpov A.A., Kamenskih A.A., Kudriashov V.P. Sposob pererabotki vanadiisoderzhashchikh konverternykh shlakov [The method of vanadium-containing converter slag processing]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2230128 (2004).

11. Amirova S.A. Tekhnologiya izvlecheniia vanadiia iz konverternykh vanadievyykh shlakov [Technology of Vanadium recovery from Vanadium-containing converter slag]. Perm', Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1997, 90 p.

12. Amirova S.A., Danilov N.F., Ivshin V.V., Simonova G.A. Intensifikatsiia protsessa vyshchelachivaniia obozhzhennykh vanadievyykh shikht. Kompleksnaia pererabotka mineral'nogo syr'ia metodami shchelochnoi metallurgii [Intensification of roasted vanadium furnace feed leaching process. Complex minerals processing by alkali metallurgy methods]. *Tezisy dokladov III Respublikanskoy konferencii*. Alma-Ata, 1982, pp. 78-79.

13. Haehn Reinhard DIPL ING DR ING, Sattelberger Siegfried DR ING, Fichte Rudolf Dr ING, Retelsdorf Hans-Joachim DR ING Process for the extraction of vanadium from vanadium-containing raw materials. Patent DE 3536495 (1987).

14. Amirova S.A., Kremneva O.G Khimiia, tekhnologiya i primenenie vanadievyykh soedinenii [Chemistry, technology and usage of Vanadium compounds]. *Tezisy dokladov IV soveshchaniia*. Sverdlovsk, 1982, p. 123.

15. Muzgin V.N., Khamzina L.B., Zolotavin V.L., Bezrukov I.Ia. Analiticheskaya khimiia vanadiia [Analytical chemistry of vanadium]. Moscow, Nauka, 1981, 216 p.

Получено 12.05.2017

Об авторах

Сажина Мария Михайловна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sazhina-mm@yandex.ru).

Данилов Николай Федорович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, академик Академии технологических наук РФ, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: super.dan51@yandex.ru).

Старостин Андрей Георгиевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: starostin26@yandex.ru).

About the authors

Mariya M. Sazhina (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: sazhina-mm@yandexl.ru).

Nikolai F. Danilov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. of Technical Sciences, Academician of the Academy of Technological Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: super.dan51@yandex.ru).

Andrej G. Starostin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. of Technical sciences, Senior Research Officer, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: starostin26@yandex.ru).