



УДК 669.162.1

DOI 10.17073/0368-0797-2026-2-155-162



Оригинальная статья

Original article

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАГЕНТНОГО ОКИСЛЕНИЯ МАСЛА ЗАМАСЛЕННОЙ ОКАЛИНЫ В УСЛОВИЯХ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

А. С. Харченко[✉], А. С. Савинов, В. И. Сысоев, А. В. Дзюба,
С. К. Сибатуллин, Е. О. Харченко

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Россия, 455000, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

✉ as.mgtu@mail.ru

Аннотация. Методами физического моделирования авторы изучали процессы окисления углеводородов масла замасленной прокатной окалины применительно к загрузке ее в доменную печь внутри металлических контейнеров размерами 85×83,4 мм при включении в состав загружаемого материала реагента-окислителя. В качестве окислителя углеводородов масла выступала аммиачная селитра (NH_4NO_3), которая подвергается термическому разложению с выделением кислорода при температуре 210 °С, что соответствует температурному интервалу 200 – 400 °С с наибольшей интенсивностью выделения паров масла из замасленной окалины и позволяет окислителю активно взаимодействовать с парами масла. Долю окислителя изменяли в интервале от 15 до 40 % от массы замасленной окалины. При содержании селитры 40 % от массы загружаемой замасленной окалины степень разложения масла в доменной печи достигает 90 %. Методом газовой хроматографии определен химический состав жидких продуктов в окисленной и неокисленной пробах масла, и на основе полученных данных проведена оценка группового химического состава проб. В групповом химическом составе продуктов окисления углеводородов аммиачной селитрой выявлено увеличение содержания кислородных соединений, по сравнению с остатком масла в эксперименте без использования реагента, с 10,58 до 20,54 % при уменьшении содержания предельных углеводородов с 35,44 до 29,64 % и содержания непредельных углеводородов с 18,09 до 16,20 %. Поскольку все селитры имеют высокую растворимость в воде, а их водные растворы являются взрыво- и пожаробезопасными, рекомендуется вводить реагент-окислитель в резервуар с замасленной окалиной текущего производства, имеющей высокую (от 10 до 30 %) влажность и жидкую консистенцию.

Ключевые слова: утилизация техногенных отходов, замасленная окалина, неполное окисление углеводородов, хроматографический анализ, химический состав масла, доменная печь

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZRU-2026-0003).

Для цитирования: Харченко А.С., Савинов А.С., Сысоев В.И., Дзюба А.В., Сибатуллин С.К., Харченко Е.О. Результаты физического моделирования реагентного окисления масла замасленной окалины в условиях доменной плавки. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(2):155–162. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-2-155-162>

* По материалам XVIII Международного Конгресса сталеплавыльщиков (г. Санкт-Петербург).

RESULTS OF PHYSICAL MODELING OF REAGENT OXIDATION OF OILED SCALE OIL UNDER BLAST FURNACE SMELTING CONDITIONS

A. S. Kharchenko[✉], A. S. Savinov, V. I. Sysoev, A. V. Dzyuba,
S. K. Sibgatullin, E. O. Kharchenko

Nosov Magnitogorsk State Technical University (38 Lenin Ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russian Federation)

✉ as.mgtu@mail.ru

Abstract. Using physical modeling methods, the authors studied the processes of hydrocarbon oxidation of oiled mill scale oil, as applied to its loading into a blast furnace inside metal containers measuring 85×83.4 mm, when an oxidizing reagent is included in the composition of the loaded material. The oil's hydrocarbon oxidizer was ammonium nitrate (NH_4NO_3), which undergoes thermal decomposition with the release

of oxygen at a temperature of 210 °C corresponding to a temperature range of 200 – 400 °C with the highest intensity of oil vapor release from oiled scale and allows the oxidizer to actively interact with oil vapor. The proportion of the oxidizer changed in the range from 15 to 40 % of the oiled scale mass. With a saltpeter content of 40 % of the loaded oiled scale mass, the degree of oil decomposition in the blast furnace reaches 90 %. Chemical composition of the liquid products in oxidized and non-oxidized oil samples was determined by gas chromatography, and based on the data obtained, the group chemical composition of the samples was evaluated. In the group chemical composition of the products of hydrocarbon oxidation with ammonium nitrate, an increase in the content of oxygen compounds was revealed, compared with the remaining oil in the experiment without using a reagent, from 10.58 to 20.54 %, while the content of saturated hydrocarbons decreased from 35.44 to 29.64 % and the content of unsaturated hydrocarbons from 18.09 to 16.20 %. Since all saltpeters have a high solubility in water, and their aqueous solutions are explosion- and fire-proof, it is recommended to load an oxidizing reagent into a tank with oiled scale of current production, which has a high (from 10 to 30 %) humidity and a liquid consistency.

Keywords: recycling of industrial waste, oiled scale, incomplete oxidation of hydrocarbons, chromatographic analysis, chemical composition of oil, blast furnace

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FZRU-2026-0003).

For citation: Kharchenko A.S., Savinov A.S., Sysoev V.I., Dzyuba A.V., Sibagatullin S.K., Kharchenko E.O. Results of physical modeling of reagent oxidation of oiled scale oil under blast furnace smelting conditions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(2):155–162.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-2-155-162>

* Based on the Materials of the 18th International Congress of Steelmakers (Saint Petersburg).

ВВЕДЕНИЕ

Проблема утилизации образующихся на металлургическом предприятии железосодержащих мелкодисперсных отходов в виде пыли, шламов и прокатной окалины в основном решается путем их использования в качестве компонентов агломерационной шихты [1; 2]. Особые трудности вызывает рециклинг по этой схеме замасленной прокатной окалины [3]. Накопление отходов замасленной окалины в шламохранилищах обуславливает экологические риски и потерю ценного вторичного ресурса с высоким содержанием железа [4].

При контакте прокатной окалины с водой, содержащей масло, образуется смесь высокой устойчивости (окалина + масло + вода) [5]. Под влиянием поверхностной энергии адсорбции частиц окалины и адгезионных свойств масла оно прочно удерживается на ее поверхности [6]. В результате из окалины, смазочных материалов и воды генерируется гетерогенный металлургический отход (размер частиц от 0 до 10 мм) – замасленная окалина [7]. Содержание железа в промасленной окалине достигает 70 – 80 %, что делает данный вид отходов ценным вторичным ресурсом [8].

Известные способы утилизации замасленной прокатной окалины предполагают предварительное обезмасливание химической [9; 10] или термической обработкой [11; 12] с последующей агломерацией [13 – 15] или брикетированием [16]. Несовершенство известных способов утилизации предопределяет низкую степень рециклинга этого техногенного ресурса и накопление его в шламохранилищах.

В этой связи актуальной представляется разработка способа утилизации замасленной окалины путем прямой загрузки в доменную печь без предварительного обезмасливания [17; 18]. Согласно патенту [18], для загрузки замасленной окалины в доменную печь вместо малопрочных брикетов из нее можно использо-

вать металлическую упаковку в виде контейнера, плавящегося при температуре не менее 1500 °C. Однако, согласно расчетам работы [19], при загрузке окускованной замасленной прокатной окалины в доменную печь объемом 1370 м³ на горизонте 2 – 5 м от поверхности засыпи температура контейнера с замасленной окалиной составит 230 – 600 °C, что соответствует началу и концу испарения масла из замасленной окалины. Незначительное количество шихтовых материалов, располагающихся над горизонтом начала испарения масла, не может гарантировать полного разложения его паров в процессе фильтрации через слой шихтовых материалов. По результатам лабораторных экспериментов [20] более 25 % масла переходит в колошниковую пыль и шлам вакуум-фильтрационных установок (ВФУ). Это может осложнить работу газоочистного оборудования печи [21]. Одним из мероприятий, направленных на повышение степени разложения масла замасленной прокатной окалины, является использование реагентов-окислителей. В связи с этим целью работы является исследование в лабораторных условиях процессов окисления масла замасленной окалины реагентом-окислителем для повышения степени его утилизации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании для воспроизведения процессов, происходящих в металлическом контейнере при загрузке в доменную печь, использовали стальной реактор (рис. 1). Объем реактора составлял 380 см³, что обеспечивало возможность загрузки 500 г замасленной окалины в эксперименте без окислителя. После загрузки материала реактор герметично закрывали крышкой с асбестовой прокладкой и отводом для парогазовой фазы и нагревали в муфельной электропечи до температуры 700 °C со скоростью 10 °C/мин с улавливанием и конденсацией паров воды и масла при помощи



Рис. 1. Лабораторный реактор для исследования процессов окисления масла замасленной прокатной окалины

Fig. 1. Laboratory reactor for studying the oxidation processes of oiled rolled scale oil

охлаждаемого проточной водой стеклянного трубчатого холодильника длиной 400 мм.

Остатки масла, пролетающие в составе паровой фазы через стеклянный холодильник в период наиболее интенсивного окисления, доосаждали в медном змеевиковом холодильнике длиной 2,5 м, погруженном в резервуар с холодной водой. За «базовый» принимали эксперимент с отгонкой масла из реактора без использования дополнительных реагентов-окислителей. В экспериментах с окислением углеводородов масла внешним окислителем использовали аммиачную селитру (NH_4NO_3). При температуре 210 °С она подвергается термическому разложению с выделением кислорода, что входит в температурный интервал 200 – 400 °С, соответствующий наибольшей интенсивности выделения паров масла из замасленной окалины [19]. Это позволяет окислителю кислороду активно взаимодействовать с парами масла. Долю окислителя изменяли в интервале от 15 до 40 % от массы замасленной окалины.

Для качественного и количественного анализов состава веществ в полученных пробах, способных

переходить в парогазовую фазу с последующей конденсацией в дистиллят, использовали метод газожидкостной хроматографии. Исследования проводили на газохроматографическом комплексе «Хроматэк Кристалл 5000» (рис. 2), а обработку данных осуществляли с помощью программы «Хроматэк Аналитик 3.0».

Пробу масла отбирали микрошприцем в объеме 1 мкл и вводили в хроматограф через испаритель, нагретый до 320 °С. Анализ выполняли на капиллярной колонке ZB-5ms (5 % фенил – 95 % диметилполисилоксан) с параметрами: длина 30 м, внутренний диаметр 0,32 мм, толщина пленки 0,25 мкм. В качестве газа-носителя применяли аргон высшего сорта (чистота 99,993 %) в соответствии с ГОСТ 10157 – 79. Анализ проводился в режиме линейного нагрева колонки до температуры 320 °С со скоростью 6 °С/мин. Для регистрации выхода компонентов смеси использовали пламенно-ионизационный детектор.

Для решения задачи качественного анализа проводили расчет линейных индексов удерживания компонентов по градуировочной смеси *n*-алканов по формуле [22]:

$$RI_{i, \text{лин}} = 100z + 100 \left(\frac{t_i - t_z}{t_{z+1} - t_z} \right),$$

где $RI_{i, \text{лин}}$ – линейный индекс удерживания *i*-го компонента смеси; *z* – число атомов углерода в *n*-алкане, вымыаемом до определяемого компонента; t_i – время удерживания определяемого компонента, с; t_z – время удерживания *n*-алкана с числом атомов углерода *z*, с; t_{z+1} – время удерживания *n*-алкана с числом атомов углерода *z* + 1, с.

Для качественной идентификации индивидуальных веществ полученные индексы сравнивали с табличными значениями индексов удерживания органических соединений из базы данных NIST GC Method and Retention Index Database.

Для количественного расчета содержаний компонентов использовали метод нормализации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Степень разложения масла

Результаты экспериментального определения степени разложения масла, рассчитанной исходя из количества собранного дистиллята, представлены ниже:

Доля аммиачной селитры от массы замасленной окалины, мас. %	Степень разложения, %
15	5
20	10
30	60
40	75



Рис. 2. Газохроматографический комплекс «Хроматэк Кристалл 5000»

Fig. 2. Gas chromatography system “Chromatec Crystal 5000”

При добавлении 15 % аммиачной селитры от массы замасленной окарины экзотермический эффект реакции окисления был незначительным, и степень разложения масла составила лишь 5 %. Начиная с содержания 20 %, проявлялось интенсивное тепловыделение. При массе аммиачной селитры 40 % от массы замасленной окарины реакция приобрела выраженный взрывной характер, что исключило возможность количественного отбора дистиллята в ходе эксперимента.

Химический состав отогнанных масел

Пример хроматограмм проб масла, отобранных соответственно в базовом эксперименте и эксперименте с добавлением аммиачной селитры в количестве 40 % от массы замасленной окарины, приведен на рис. 3. Результаты качественного и количественного анализов пробы, хроматограмма которой приведена на рис. 3, а, представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, идентифицируемая на хроматограмме рис. 3, а специфическая «гребенка» соответствует регулярно расположенным пикам линейных алканов, имеющим наиболее высокие интенсивности.

При окислении масла внешним окислителем – аммиачной селитрой – число индивидуальных соединений, идентифицированных в пробе, возросло с 81 до 115, в основном за счет формирования относительно легких продуктов окисления и окислительного разложения (регистрируемых в левой части хроматограммы на рис. 3, б), таких как ацетон, пропаналь, пропанол-1, бутанон-2, эфиры муравьиной кислоты и другие кислородсодержащие органические соединения. Всего в результате проведенного хроматографического анализа в пробах исследуемых масел было идентифицировано 151 индивидуальное химическое соединение. По результатам идентификации индивидуальных соединений произвели оценку группового химического состава масел. Эти результаты приведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что в масле, выделенном при проведении «базового» эксперимента, преобладали насыщенные, ненасыщенные и ароматические углеводороды алифатического и алициклического строения при относительно небольшом содержании кислородсодержащих соединений с различными функциональными группами, образование которых может быть объяснено окислением углеводородов масла на

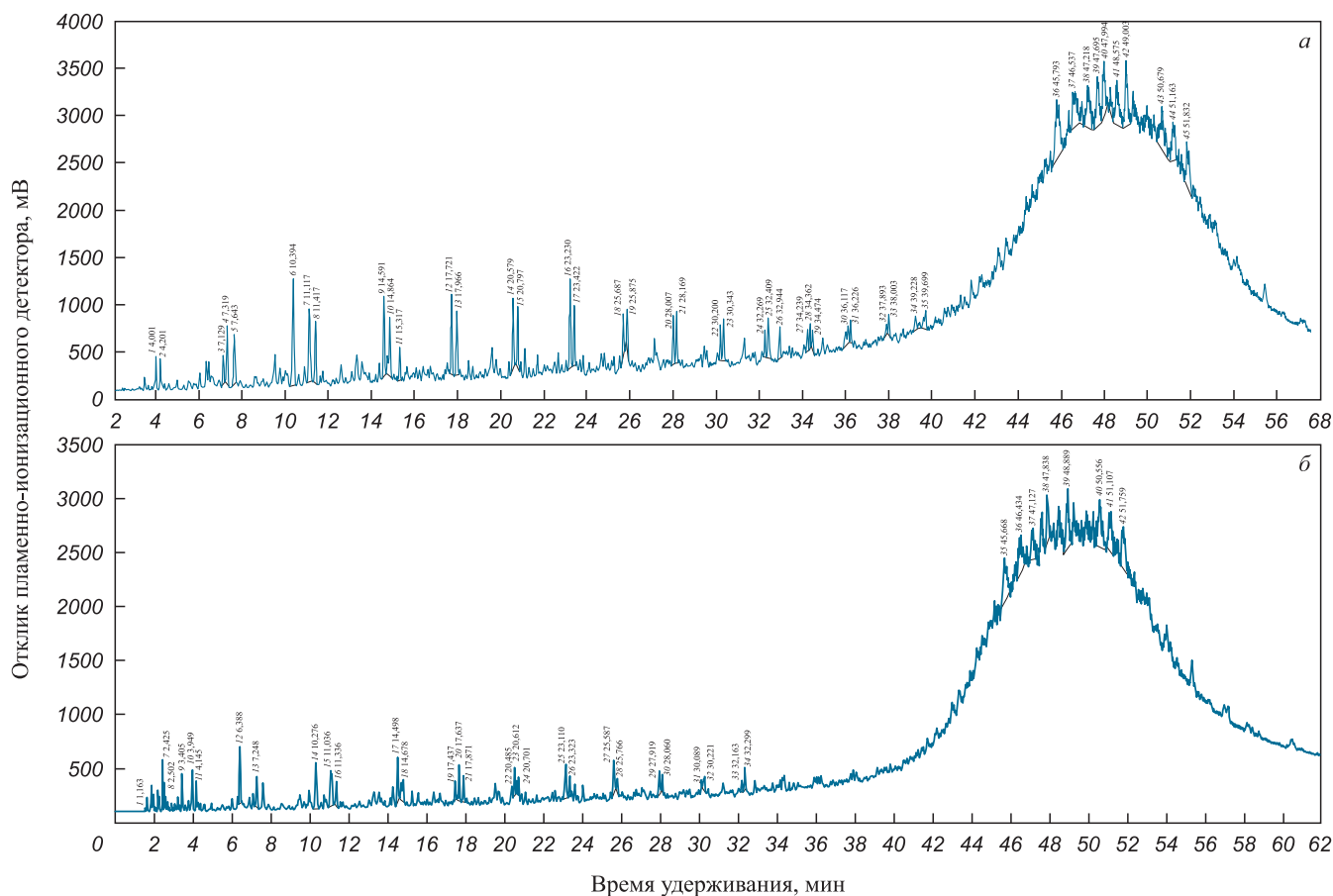


Рис. 3. Хроматограммы масел при проведении эксперимента без добавления реагента (а) и при использовании в качестве реагента-окислителя аммиачной селитры (б)

Fig. 3. Chromatograms of oils during the experiment without reagent addition (a) and when using ammonium nitrate as an oxidizing reagent (b)

Таблица 1. Химический состав масла замасленной окалины (в отсутствие реагента-окислителя; базовый эксперимент)

Table 1. Chemical composition of oiled scale oil (in the absence of an oxidizing reagent; basic experiment)

№ п/п	Наименование компонента масла	RI*	% (мас.)	№ п/п	Наименование компонента масла	RI	% (мас.)
1	гептен-1	680	0,44	42	тетрадекан	1396	1,99
2	н-гептан	692	0,43	43	октилбензол	1450	1,50
3	3-метилбутанол-1	719	0,23	44	пентадецен-1	1488	1,22
4	этилциклопентан	750	0,36	45	пентадекан	1495	1,29
5	5-метилгептен-1	758	0,53	46	5-метилпентадекан	1546	1,12
6	толуол	762	0,48	47	2,6,10 – триметилтетрадекан	1553	0,65
7	4-метилгептан	765	0,58	48	додекановая кислота	1559	0,60
8	1,4-диметилциклогексан	782	0,59	49	тридеканон-2	1581	0,49
9	октен-1	787	1,22	50	тридекан-1-ол	1588	0,93
10	н-октан	797	1,29	51	гексадекан	1595	0,98
11	1,2,4-триметилциклогексан	847	1,11	52	бензофенон	1640	0,81
12	6-метилоктен-1	853	0,52	53	тридекановая кислота	1665	0,59
13	3-метилоктан	870	2,57	54	пентадеканон-2	1682	0,52
14	4-метилпентанол-1	876	0,28	55	гептадецен-1	1688	0,73
15	2,2,4-триметилгептан	883	0,52	56	гептадекан	1695	1,45
16	нонен-1	889	1,96	57	гептадецен-8	1722	0,77
17	нонан	897	1,24	58	2,6,10-триметилгексадекан	1779	0,44
18	пропилциклогексан	931	0,68	59	гексадеканон-2	1788	0,61
19	4-этилоктан	951	0,98	60	октадецен-1	1794	0,63
20	5-метилнонан	959	0,65	61	октадекан	1800	0,49
21	децен-4	983	0,41	62	3-этилбензофенон	1826	0,48
22	децен-1	989	1,65	63	4,8,12-триметилгептадекан	1837	0,31
23	декан	997	1,79	64	циклогексадекан	1882	0,56
24	1-метилпропилбензол	1011	0,60	65	нонадецен-1	1888	0,39
25	ундецен-1	1089	1,66	66	нонадекан	1894	0,52
26	ундекан	1096	1,42	67	эйкозен-1	1988	0,53
27	3-гексилциклопентен	1115	0,41	68	эйкозан	1994	0,54
28	пентилциклогексан	1122	0,32	69	6-метилэйкозан	2066	0,50
29	5-этилдекан	1154	0,85	70	генэйкозан	2094	0,69
30	нонанол-1	1161	0,42	71	4-этилэйкозан	2148	0,53
31	додецен-1	1189	1,39	72	терфенил	2158	0,55
32	додекан	1196	1,20	73	2-метилгенэйкозан	2169	0,82
33	2,5-диметилундекан	1209	0,64	74	докозан	2195	0,49
34	ундеканон-6	1231	0,65	75	эйкозанон-2	2206	0,45
35	2-метилдодекан	1267	0,41	76	2,6,10,14,19-пентаметилэйкозан	2226	0,73
36	тридецен-1	1288	2,03	77	эйконазол-1	2252	0,68
37	тридекан	1296	1,32	78	генэйкозанол-2	2307	1,73
38	тридецен-2	1312	0,41	79	метиловый эфир эйкозановой кислоты	2331	1,09
39	бифенил	1346	0,47	80	тетракозан	2394	2,07
40	4-циклогексилдекан	1352	0,34	81	бенз(а)пирен	н/д	0,001
41	тетрадецен-1	1388	1,20				

* RI – линейный индекс удерживания.

Таблица 2. Групповой химический состав исследуемых масел

Table 2. Group chemical composition of the studied oils

Название класса	Количество, %	
	базовый эксперимент	с добавлением реагента-окислителя
Углеводороды:		
предельные	35,44	29,64
непредельные	18,09	16,20
ароматические	3,61	3,63
Спирты	4,28	5,65
Альдегиды	–	0,34
Кетоны	4,01	4,49
Карбоновые кислоты	1,19	3,37
Сложные эфиры	1,09	6,68
Неидентифицированные соединения (содержание каждого компонента менее 0,5 мас. %)	32,29	30,00
Сумма	100,00	100,00

этапе прокатки металла при контакте с поверхностью горячего металла, а также при дальнейшем хранении замасленной окалины в отвалах на открытом воздухе.

Использование аммиачной селитры уменьшило суммарную площадь пиков предельных углеводородов с 35,44 до 29,64 % (на 16,37 отн. %) и непредельных углеводородов с 18,09 до 16,2 % (на 10,45 отн. %) при суммарном увеличении содержания кислородных соединений с 10,58 до 20,54 % (на 94,14 отн. %). Количество спиртов выросло с 4,28 до 5,65 % (на 32 отн. %). В целом, при использовании аммиачной селитры в качестве реагента-окислителя наблюдается более сложный и окисленный состав пробы, увеличивается содержание кислородсодержащих веществ, преимущественно продуктов глубокого окисления (карбоновые кислоты, сложные эфиры).

Поскольку все селитры имеют высокую растворимость в воде, а их водные растворы являются взрыво- и пожаробезопасными, рекомендуется вводить реагент-окислитель в резервуар с замасленной окалиной текущего производства, имеющей высокую (10 – 30 %) влажность и жидкую консистенцию. В этом случае для равномерного распределения селитры требуется минимальное перемешивание. Хранение такой жидкой смеси замасленной окалины с селитрой осуществляется в стальных или полипропиленовых резервуарах, откуда в дальнейшем проводится заполнение индивидуальных металлических контейнеров для подачи в доменную печь.

Выполненное исследование позволяет предложить способ утилизации замасленной окалины в металли-

ческом контейнере с использованием аммиачной селитры с содержанием 30 – 40 % от массы загружаемого материала, что обеспечивает 60 – 75 % разложения. Если учесть, что 75 % паров масла разлагается в процессе фильтрации его через слой шихтовых материалов, располагающихся над горизонтом начала его испарения [20], то получим общую степень сгорания и разложения масла, достигающую 90 %.

Выводы

В лабораторных условиях проведено исследование эффективности окисления масла замасленной окалины при использовании в качестве реагента-окислителя аммиачной селитры. Содержание селитры 40 % от массы загружаемой замасленной окалины обеспечило наиболее высокую степень разложения масла, равную 75 %. При окислении масла селитрой в недогоревшем остатке масла наблюдается увеличение содержания кислородных соединений с 10,58 до 20,54 % при уменьшении суммарной площади пиков предельных углеводородов с 35,44 до 29,64 % и непредельных углеводородов с 18,09 до 16,20 % по сравнению с остатком масла в базовом эксперименте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Булатов К.В., Газалеева Г.И. Перспективы развития технологий переработки отходов черной металлургии. В кн.: *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды V Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН–2021»*. Екатеринбург: УрО РАН; 2021:21–33.
2. Ровин С.Л., Ровин Л.Е. Новая концепция рециклинга дисперсных железосодержащих отходов. В кн.: *Труды X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», Москва, 9–13 ноября 2020 г.* Москва: Маска; 2020:238–243.
3. Леонтьев Л.И., Пономарев В.И., Шешуков О.Ю. Переработка и утилизация техногенных отходов металлургического производства. *Экология и промышленность России*. 2016;20(3):24–27. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-3-24-27>
4. Leont'ev L.I., Ponomarev V.I., Sheshukov O.Yu. Recycling and disposal of industrial waste from metallurgical production. *Ecology and Industry of Russia*. 2016;20(3):24–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-3-24-27>
5. Remus M., Monsonet M.A.A., Roudier S., Sancho L.D. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Luxembourg: Publications office of the European Union; 2013:627.
6. Yessengaliev D., Mukhametkhan M., Mukhametkhan Ye., Zhabalova G., Kelamanov B., Kolesnikova O., Shyngysbayev B., Aikozova L., Kaskataeva K., Kuatbay Y. Studies of the possibility of improving the quality of iron ores and processing of technogenic composite iron-containing waste of metallurgical production. *Journal of Composites Science*. 2023;7(12):501. <https://doi.org/10.3390/jcs7120501>

6. Furmanski L.M., Muller T.G., Nuernberg Ju.B., Martins M.A., Arnt Å.B.C., da Rocha M.R., Zaccaron A., Peterson M. Efficient production of ferrous sulfate from steel mill scale waste. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2024;10(3):1783–1794. <https://doi.org/10.1007/s40831-024-00900-8>
7. Hryhoriev S., Petryshchev A., Sinyaeva N., Yurchenko A., Sklyar O., Kvitka S., Borysov V., Vlasiuk V., Tsybmal B., Borysova S. Studying the physicochemical properties of alloyed metallurgical waste as secondary resources saving raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018;4(12(94)):43–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140924>
8. Shatokha V.I., Gogenko O.O., Kripak S.M. Utilising of the oiled rolling mills scale in iron ore sintering process. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011;55(4):435–440. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.006>
9. Танутров И.Н., Свиридова М.Н., Чесноков Ю.А., Маршук Л.А. Технологическое моделирование совместного выщелачивания замасленной прокатной окалины и красного шлама. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(11-12):891–898. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-891-898>
Tanutrov I.N., Sviridova M.N., Chesnokov Yu.A., Marshuk L.A. Technological modeling of joint leaching of oily rolling scale and red mud. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(11-12):891–898. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-891-898>
10. Танутров И.Н., Свиридова М.Н. Направления совершенствования способов переработки техногенных отходов Уральского региона. *Экология и промышленность России*. 2015;19(8):31–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-8-31-35>
Tanutrov I.N., Sviridova M.N. Directions to improve the processing methods of anthropogenic waste of the Ural region. *Ecology and industry of Russia*. 2015;19(8):31–35. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-8-31-35>
11. Чесноков Ю.А., Маршук Л.А., Танутров И.Н., Свиридова М.Н. Пирометаллургическая схема совместной переработки красных шламов и прокатной окалины. В кн.: *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды V Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН–2021»*. Екатеринбург: УрО РАН; 2021;415–419.
12. Неменов А. М. События в цифрах и фактах. *Металлург*. 2016;(9):104–112.
Nemenov A.M. Events in figures and facts. *Metallurg*. 2016;(9):104–112. (In Russ.).
13. А.с. 1407979 А1 СССР, МПК C22B 1/14. Шихта для утилизации замасленной окалины при агломерации / А.А. Готовцев, Ю.Г. Ефименко, А.В. Кабанов, Ю.И. Коваль, И.М. Сальников, Е.Я. Стольберг, Ю.А. Хватов; заявл. 13.05.1986; опубл. 07.07.1988. Бюл. № 25.
14. А.с. 1086024 А1 СССР, МПК C22B 1/16. Способ агломерации железорудных материалов / В.И. Ростовский, С.Т. Плискановский, А.И. Иванов, В.Б. Исполатов, В.Д. Гладуш, И.И. Ручкин, А.Г. Жунев, А.Ф. Голубов, Н.А. Короп; заявл. 17.12.1981; опубл. 15.04.1984. Бюл. № 14.
15. Пат. 2418079 C2 РФ, МПК C22B 1/16. Способ производства агломерата для доменной плавки / М.А. Гуркин, М.С. Табаков, В.Н. Логинов, Е.А. Кашкаров, В.П. Невраев, А.С. Нестеров, В.Ю. Кучин, Т.В. Деткова, В.С. Якушев; заявл. 06.07.2009; опубл. 10.05.2011. Бюл. № 13.
16. Пат. 2321647 C1 РФ, МПК C22B 1/242, C22B 1/245. Способ брикетирования железосодержащих отходов в виде окалины для плавки / А.И.Ш. Салех, А.М. Грицишин; заявл. 06.07.2006; опубл. 10.04.2008. Бюл. № 10.
17. Пат. 2730304 C1 РФ, МПК F23G 7/05, F23G 5/027. Способ утилизации масло-нефтепродуктов, замасленной окалины, отходов коксохимического производства / И.Ш. Хуснутдинов, С.И. Хуснутдинов, А.А. Алексеева, В.Ю. Бажин, О.А. Дубовиков, Л.Ш. Иоганн; заявл. 19.03.2019; опубл. 21.08.2020. Бюл. № 24.
18. Пат. RU 2131929 C1 РФ, МПК C21B 5/00. Способ получения чугуна с использованием доменного производства на металлургическом предприятии / В.И. Губанов, Р.В. Сейфулов, В.Н. Селиванов, П.И. Черноусов, Ю.С. Юсфин; заявл. 26.06.1998; опубл. 20.06.1999.
19. Савинов А.С., Харченко А.С., Сибгатуллин С.К., Дзюба А.В., Сысоев В.И., Харченко Е.О., Павлов А.В. Прогнозирование температуры замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, при движении в доменной печи от колошника к горну. *Теория и технология металлургического производства*. 2024;(4(51)):24–29.
Savinov A.S., Kharchenko A.S., Sibgatullin S.K., Dzyuba A.V., Sysoev V.I., Kharchenko E.O., Pavlov A.V. Forecasting the temperature of oiled scale packed in a metal container when moving in a blast furnace from the blast-furnace mouth to the iron receiver. *Theory and Technology of Metallurgical Production*. 2024;(4(51)):24–29. (In Russ.).
20. Харченко А.С., Сысоев В.И., Сибгатуллин С.К., Дзюба А.В., Савинов А.С., Харченко Е.О. Моделирование распределения компонентов, выделившихся из замасленной окалины, между водо-газо-пылевыми средами системы газоочистки доменной печи. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):332–338. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-332-338>
Kharchenko A.S., Sysoev V.I., Sibgatullin S.K., Dzyuba A.V., Savinov A.S., Kharchenko E.O. Modeling the distribution of components emitted from oiled scale between water, gas, and dust media in blast furnace dedusting plant. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):332–338. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-332-338>
21. Somova Yu.V., Sviridova T.V., Alekseeva P.A., Neke-rov E.A., Schwabecher D. Analysis of methods for processing oily mill scale and oily sludge for iron and steel production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;839:042046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/4/042046>
22. Головная Р.В., Арсеньев Ю.Н. Система индексов удерживания и ее физико-химическое применение. *Успехи химии*. 1973;42(12):2221–2246.
Golovnya R.V., Arsen'ev Yu.N. The retention index system and its physico-chemical application. *Uspekhi khimii*. 1973;42(12):2221–2246. (In Russ.).

Сведения об авторах

Information about the Authors

Александр Сергеевич Харченко, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0000-0002-0454-6399

E-mail: as.mgtu@mail.ru

Александр Сергеевич Савинов, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой механики, директор института металлургии, машиностроения и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0000-0001-7440-5404

E-mail: savinov_nis@mail.ru

Виктор Иванович Сысоев, к.т.н., заведующий лабораторией кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0000-0003-3537-7695

E-mail: v.sysoev@magtu.ru

Андрей Викторович Дзюба, аспирант кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0000-0002-7303-8208

E-mail: dzyuba.98@bk.ru

Салават Камиллович Сибатагуллин, д.т.н., профессор кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0009-0004-0220-0126

E-mail: 10tks@mail.ru

Елена Олеговна Харченко, к.т.н., старший преподаватель кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

E-mail: eo.mgtu@mail.ru

Aleksandr S. Kharchenko, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0000-0002-0454-6399

E-mail: as.mgtu@mail.ru

Aleksandr S. Savinov, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Mechanics, Director of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0000-0001-7440-5404

E-mail: savinov_nis@mail.ru

Victor I. Sysoev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0000-0003-3537-7695

E-mail: v.sysoev@magtu.ru

Andrei V. Dzyuba, Postgraduate of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0000-0002-7303-8208

E-mail: dzyuba.98@bk.ru

Salavat K. Sibagatullin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0009-0004-0220-0126

E-mail: 10tks@mail.ru

Elena O. Kharchenko, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University

E-mail: eo.mgtu@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. С. Харченко – постановка задачи, анализ результатов исследований, формулирование выводов.

А. С. Савинов – постановка задачи, анализ результатов исследований, формулирование выводов.

В. И. Сысоев – испытания образцов на газохроматографическом комплексе «Хроматэк Кристалл 5000».

С. К. Сибатагуллин – проведение расчетов, получение результатов, выполнение рисунков и графиков для статьи.

А. В. Дзюба – описание результатов, формулирование выводов, критический анализ литературы.

Е. О. Харченко – комплексное исследование, анализ результатов исследований.

A. S. Kharchenko – conceptualization, analysis of research results, formulation of conclusions.

A. S. Savinov – conceptualization, analysis of research results, formulation of conclusions.

V. I. Sysoev – testing of samples on the gas chromatographic complex "Chromatec Crystal 5000".

S. K. Sibagatullin – carrying out calculations, obtaining results, preparing drawings and graphs.

A. V. Dzyuba – description of results, formulation of conclusions, critical literary analysis.

E. O. Kharchenko – comprehensive research, analysis of research results.

Поступила в редакцию 19.01.2026

После доработки 09.02.2026

Принята к публикации 24.02.2026

Received 19.01.2026

Revised 09.02.2026

Accepted 24.02.2026