

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ЖЕЛЕЗА ИЗ СИЛИКАТНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ С
ПРИМЕНЕНИЕМ Na_2O

Холикулов Дониёр Бахтиёрович

Алмалыкский государственный технический институт, DSc, профессор,
Алмалык, Узбекистан E-mail: Kholikulov.d@tdtuof.uz

Хожиев Шохрух Тошпулатович

Алмалыкский государственный технический институт, PhD, доцент,
Алмалык, Узбекистан E-mail: shohruhhojiyev@gmail.com

Шайманов Икромжон Исматулла угли

Алмалыкский государственный технический институт, докторант (PhD),
Алмалык, Узбекистан E-mail: ikromshaymano5@gmail.com

Муталибхонов Саидаълохон Саидолимхонович

Алмалыкский государственный технический институт, докторант (PhD),
Алмалык, Узбекистан E-mail: mutalibkhonov1990@gmail.com

Жавлиев Сирожиддин Суёнович

Алмалыкский государственный технический институт, докторант (PhD),
Алмалык, Узбекистан E-mail: shohruhhojiyev@gmail.com

**ИНФОРМАЦИЯ О
СТАТЬЕ**

АННОТАЦИЯ:

ИСТОРИЯ СТАТЬИ:

Received: 28.04.2026

Revised: 29.04.2026

Accepted: 30.04.2026

**КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА:**

фаялит, черная
металлургия,
восстановление железа,
силикатные шлаки, оксид
натрия, энергия Гиббса,
термодинамический

В работе проведён термодинамический анализ процесса карботермического восстановления фаялита – основного железосодержащего компонента силикатных шлаков черной металлургии – с использованием оксидов кальция и натрия в качестве флюсующих добавок. Показано, что реакция с участием Na_2O является экзотермической и обладает более высокой энергетической эффективностью по сравнению с CaO . Сравнительный анализ изменения энергии Гиббса и констант равновесия в диапазоне температур 323–1873 К показал, что при применении Na_2O восстановление железа происходит

*анализ, энергетическая
эффективность.*

самопроизвольно даже при пониженных температурах. Установлено, что оптимальный температурный интервал составляет 1205–1300 °С, с наивысшей эффективностью около 1250 °С. Это обеспечивает устойчивость процесса, разделение жидкого чугуна и силикатного шлака. Также показано, что снижение дозировки Na_2O до 1 моль повышает экономическую эффективность без потери термодинамических преимуществ. Полученные результаты представляют практическую ценность для разработки ресурсосберегающих технологий переработки металлургических шлаков с целью извлечения железа.

Введение.

В современном производстве стали ведущую роль занимает пирометаллургический способ, при котором основным сырьём служит железная руда [1]. Железо в руде присутствует в виде оксидов, таких как магнетит, гематит и вюстит, обладающих магнитными свойствами. По этой причине их можно эффективно отделять от пустой породы методом магнитной сепарации [2]. Однако данный метод направлен исключительно на извлечение оксидных форм железа и не распространяется на его наиболее распространённые соединения, такие как силикаты и сульфиды, поскольку они характеризуются низкой магнитной восприимчивостью [3–4].

Основными источниками силикатных соединений железа являются металлургические шлаки, образующиеся при производстве стали и меди [5]. Содержание железа в них достигает 35–45 %, причём значительная его часть находится в форме фаялита (Fe_2SiO_4) [6–7]. Извлечение железа из шлаков, содержащих фаялит, представляет значительную технологическую сложность, поскольку для выделения железа требуется восстановление с использованием твёрдого углерода [8]. Однако данный процесс является эндотермическим и требует значительных затрат тепловой энергии, что снижает его экономическую эффективность. В связи с этим разработка энергосберегающих технологий извлечения железа из фаялитсодержащих шлаков является актуальной задачей металлургической промышленности. Для создания таких

технологий необходимы детальные термодинамические исследования процесса восстановления железа, что позволит оптимизировать технологические параметры и снизить энергозатраты [9]. Для извлечения железа и его сплавов из шлаков, содержащих фаялит, разработан ряд энергосберегающих технологий, адаптированных к сырьевой базе определённых регионов или конкретных металлургических предприятий [10]. Например, в технологии «Romelt» на поверхность жидкого шлака загружаются энергетический уголь и флюсовые материалы, а для повышения эффективности восстановления шлаковая ванна продувается воздухом, обогащённым кислородом [11]. В данном процессе в качестве флюса используется оксид кальция (CaO). На первой стадии реакции оксид кальция взаимодействует с фаялитом, вытесняя из его состава оксид железа; в дальнейшем этот оксид восстанавливается углеродом с образованием жидкого чугуна. Выделившийся диоксид кремния вступает в реакцию с оксидами кальция с образованием ортосиликата кальция. Однако высокая температура плавления ортосиликата кальция (2130 °C) требует дополнительного расхода топлива для поддержания шлаковой ванны в жидком состоянии, что является недостатком данной технологии [12].

С целью экономии первичных железосодержащих ресурсов также рассматриваются способы вовлечения в процесс богатых железом конвертерных [13] и электропечных шлаков [14], а также использование полиэтиленовых отходов в виде агломерата для снижения расхода топлива и восстановителя при восстановлении железосодержащих материалов [15].

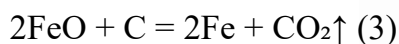
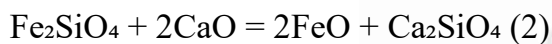
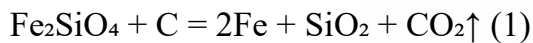
Целью настоящего исследования является термодинамический анализ энергетической эффективности использования оксида натрия в качестве флюса вместо оксида кальция при извлечении железа из фаялитсодержащих шлаков.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- составлены химические реакции, протекающие в системе;
- определены стандартные термодинамические параметры реакций на основе справочных данных;
- выведены уравнения зависимости свободной энергии Гиббса от температуры для каждой реакции;
- рассчитаны изменения свободной энергии и константы равновесия реакций в заданном температурном интервале;

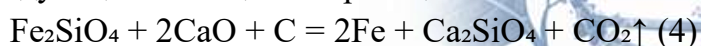
— проведён сравнительный анализ энергетической эффективности реакций с использованием диаграммы Эллингема.

Объект исследования и методика. В качестве объектов исследования были выбраны фаялит, оксид кальция, углеродсодержащие материалы, а также основные химические реакции, протекающие между ними. Уравнения данных реакций приведены ниже:



Первая химическая реакция представляет собой непосредственную термическую переработку фаялита углеродом, при которой содержащееся в нём железо восстанавливается до состояния чистого металла. Данная реакция носит эндотермический характер и сопровождается поглощением 173,35 кДж/моль тепла. Поскольку значение свободной энергии Гиббса при стандартных условиях является положительным, реакция не может протекать самопроизвольно (спонтанно) в стандартных условиях. В результате реакции наблюдается увеличение энтропии. Вторая и третья реакции также относятся к эндотермическим процессам. Для этих реакций значения свободной энергии при стандартных условиях также положительны, следовательно, они не протекают самопроизвольно в стандартных условиях и требуют повышенных температур [16].

Для термодинамического анализа указанных реакций не поэтапно, а как единого процесса, вторую и третью реакции можно объединить и представить в виде следующей обобщённой реакции:



Изучение термодинамических характеристик четвёртой реакции показало, что для её протекания требуется значительное количество внешней тепловой энергии. Данный вывод подтверждается также термодинамическим анализом общей реакции, объединяющей вышеуказанные химические процессы: для её осуществления необходимы очень высокие температуры ($T > 2500 \text{ }^\circ\text{C}$).

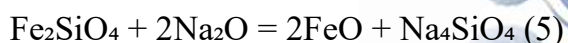
В настоящем исследовании авторами предложен способ повышения эффективности эндотермических реакций, протекающих в металлургических процессах, за счёт введения в систему экзотермических реакций.

При термодинамическом обосновании физико-химических процессов карботермического восстановления железа из фаялита был применён метод анализа изменения свободной энергии Гиббса системы в зависимости от температуры [17]. На

основе полученных данных были оценены константы равновесия химических реакций при различных температурах, а также определена наиболее медленная (лимитирующая) химическая стадия процесса.

Для расчёта термодинамических параметров и моделирования химических реакций между реагентами использовалась программа FactSage.

В данном исследовании при карботермической переработке фаялита с целью интенсификации выделения металлического железа при сравнительно низких температурах предложено использовать в качестве флюсового материала оксид натрия вместо оксида кальция:



Энтальпия реакции взаимодействия фаялита с оксидом натрия имеет отрицательное значение, то есть процесс является экзотермическим. Значение свободной энергии Гиббса также отрицательно, что свидетельствует о возможности самопроизвольного протекания данной реакции в стандартных условиях (табл. 1).

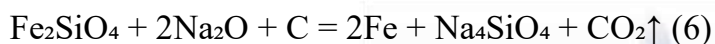
Таблица 1.

Стандартные термодинамические параметры пятой химической реакции при стандартных условиях (298 К).

Химическая реакция	$\Delta H^0_{\text{реак}}$, кДж/моль	$\Delta G^0_{\text{реак}}$, кДж/моль	$\Delta S^0_{\text{реак}}$, кДж/(К*моль ь)
$\text{Fe}_2\text{SiO}_4 + 2\text{Na}_2\text{O} = 2\text{FeO} + \text{Na}_4\text{SiO}_4$	-329,16	-334,87	96,91

Поскольку значение энтропии для данной реакции при стандартных условиях является положительным, повышение температуры свидетельствует о возрастании вероятности протекания данной химической реакции.

Современные исследования в области инженерии химических процессов доказали, что эффективность эндотермических процессов может быть повышена за счёт введения в систему экзотермических реакций. В связи с этим в рассматриваемом случае было признано целесообразным объединить третью и пятую химические реакции. В результате общее химическое уравнение процесса принимает следующий вид:



Рассчитанные термодинамические параметры шестой химической реакции при стандартных условиях приведены в таблице 2.

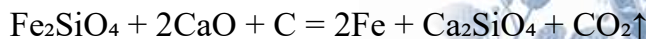
Таблица 2.

Термодинамические параметры шестой химической реакции при стандартных условиях (298 К).

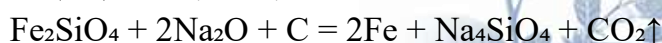
Химическая реакция	$\Delta H^0_{\text{реак}}$, кДж/моль	$\Delta G^0_{\text{реак}}$, кДж/моль	$\Delta S^0_{\text{реак}}$, кДж/(К*моль)
$\text{Fe}_2\text{SiO}_4 + 2\text{Na}_2\text{O} + \text{C} = 2\text{Fe} + \text{Na}_4\text{SiO}_4 + \text{CO}_2\uparrow$	-192,67	-241,25	162,24

На основании значений, приведённых в таблице, можно сделать вывод, что шестая химическая реакция носит экзотермический характер и способна протекать самопроизвольно (спонтанно) при стандартных условиях.

Полученные результаты и их обсуждение. С целью сопоставления применения флюсовых материалов — оксида кальция и оксида натрия — при карботермической переработке фаялита, а также оценки энергетической эффективности были выведены математические зависимости, отражающие влияние повышения температуры в реакционных системах на протекание каждой химической реакции. Эти выражения имеют следующий вид:



$$\Delta G_{(\text{CaO})} = 683,8 - 0,24102 \cdot T$$



$$\Delta G_{(\text{Na}_2\text{O})} = -192,67 - 0,16224 \cdot T$$

На основании рассчитанных математических выражений была оценена вероятность протекания каждой химической реакции при повышении температуры реакционной системы на каждые 50 единиц. Учитывая, что процессы выплавки стали обычно осуществляются при температурах до 1600 °С, для термодинамического анализа было признано целесообразным выбрать температурный интервал 50–1600 °С (323–1873 К).

Согласно полученным данным, в интервале температур 323–1873 К с повышением температуры значения свободной энергии Гиббса для обеих реакций уменьшаются (табл. 3). Из таблицы видно, что реакция с участием оксида кальция сохраняет положительные значения свободной энергии в данном температурном диапазоне. Напротив, для реакции с участием оксида натрия энергия Гиббса остаётся отрицательной и линейно уменьшается с ростом температуры. Это свидетельствует о

том, что повышение температуры дополнительно увеличивает вероятность протекания восстановительной реакции с участием оксида натрия.

Таблица 3.

Сравнительный анализ изменения энергии Гиббса и констант равновесия в зависимости от температуры для химических реакций с участием оксидов кальция и натрия.

№	T, K	T, °C	ΔG_{CaO} , кЖ/МОЛЬ	ΔG_{Na_2O} , кЖ/МОЛЬ	K_{CaO}	K_{Na_2O}
1	323	50	605,95	-245,07	0,798	1,096
2	373	100	593,90	-253,19	0,826	1,085
3	423	150	581,85	-261,30	0,847	1,077
4	473	200	569,80	-269,41	0,865	1,071
5	523	250	557,75	-277,52	0,880	1,066
6	573	300	545,70	-285,63	0,892	1,062
7	623	350	533,64	-293,75	0,902	1,058
8	673	400	521,59	-301,86	0,911	1,055
9	723	450	509,54	-309,97	0,919	1,053
10	773	500	497,49	-318,08	0,925	1,051
11	823	550	485,44	-326,19	0,931	1,049
12	873	600	473,39	-334,31	0,937	1,047
13	923	650	461,34	-342,42	0,942	1,046
14	973	700	449,29	-350,53	0,946	1,044
15	1023	750	437,24	-358,64	0,950	1,043
16	1073	800	425,19	-366,75	0,953	1,042
17	1123	850	413,13	-374,87	0,957	1,041
18	1173	900	401,08	-382,98	0,960	1,040
19	1223	950	389,03	-391,09	0,962	1,039
20	1273	1000	376,98	-399,20	0,965	1,038
21	1323	1050	364,93	-407,31	0,967	1,038

22	1373	1100	352,88	-415,43	0,970	1,037
23	1423	1150	340,83	-423,54	0,972	1,036
24	1473	1200	328,78	-431,65	0,973	1,036
25	1523	1250	316,73	-439,76	0,975	1,035
26	1573	1300	304,68	-447,87	0,977	1,035
27	1623	1350	292,62	-455,99	0,979	1,034
28	1673	1400	280,57	-464,10	0,980	1,034
29	1723	1450	268,52	-472,21	0,981	1,034
30	1773	1500	256,47	-480,32	0,983	1,033
31	1823	1550	244,42	-488,43	0,984	1,033
32	1873	1600	232,37	-496,55	0,985	1,032

Повышение температуры оказывает положительное влияние на кинетику химической реакции с участием оксида кальция, однако отрицательно сказывается на реакции с участием оксида натрия. Несмотря на это, при всех рассмотренных температурах константа равновесия восстановительной реакции с участием оксида натрия остаётся больше единицы. Снижение скорости данной реакции с ростом температуры объясняется её экзотермическим характером: поскольку реакция протекает с выделением тепла, дополнительный нагрев системы приводит к ускорению обратной реакции, вследствие чего константа равновесия уменьшается с повышением температуры [18].

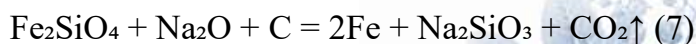
С целью оценки энергетической эффективности процесса карботермического восстановления фаялита была проведена термодинамическая оценка возможности замены CaO на Na₂O. Полученные результаты показали, что введение Na₂O в систему обеспечивает значительно более высокую энергетическую эффективность по сравнению с CaO (см. табл. 3). Особенно существенная разница в значениях энергии Гиббса наблюдается при низких температурах для аналогичных реакций. Так, при условной температуре 1250 °С, при которой предполагается нахождение всех участвующих веществ в жидком состоянии, разность значений энергии Гиббса для реакций с участием CaO и Na₂O составляет:

$$316,73 - (-439,76) = 756,49 \text{ кДж/моль.}$$

Это подтверждает высокую энергетическую эффективность применения оксида натрия. Хотя использование Na₂O вместо CaO повышает эффективность

восстановительной реакции, высокая стоимость оксида натрия может отрицательно сказаться на экономической целесообразности процесса. В связи с этим необходимо принять меры по снижению расхода Na_2O в реакционной системе.

С этой целью в рамках настоящего исследования было проведено термодинамическое изучение влияния снижения количества оксида натрия до 1 моль в шестой реакции на эффективность процесса. Химическое уравнение процесса имеет следующий вид:



Результаты термодинамического анализа седьмой химической реакции представлены на рисунке 1.

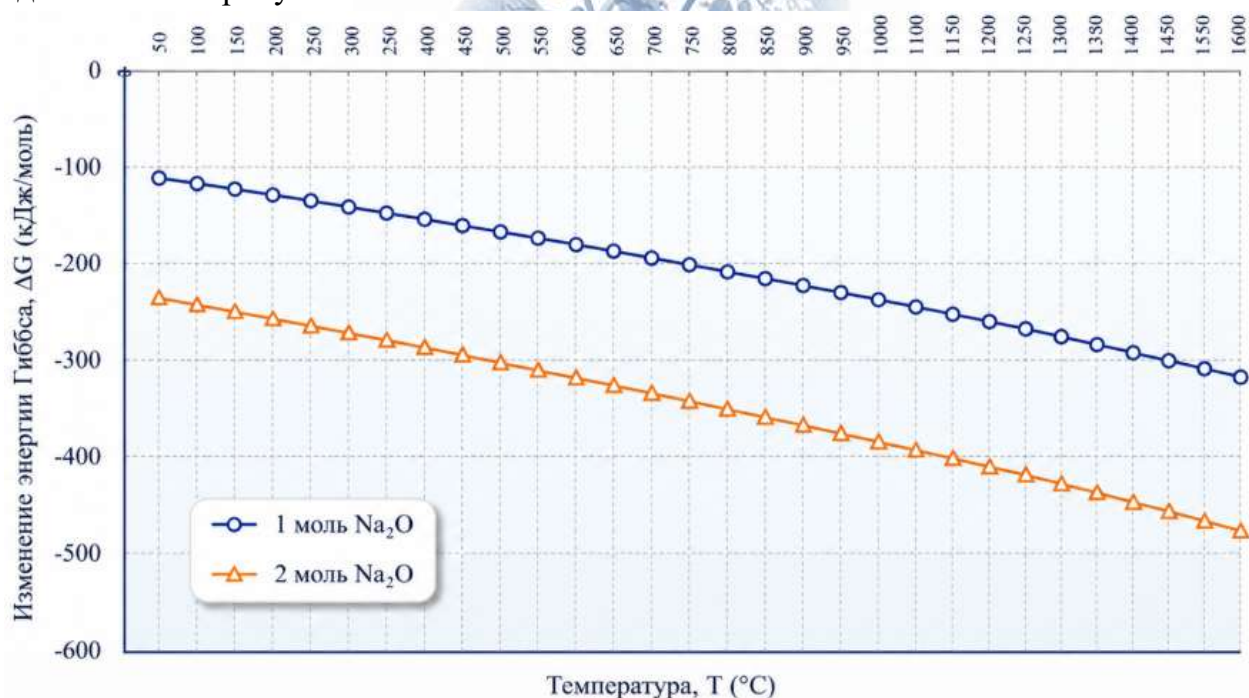


Рис. 1. Изменение энергии Гиббса при различных количествах оксида натрия в процессе карботермической переработки фаялита (диаграмма Эллингема)

На рисунке 1 показано изменение свободной энергии Гиббса (ΔG) в процессе карботермической переработки фаялита при участии 1 и 2 моль Na_2O . Из графика видно, что в обоих случаях с повышением температуры наблюдается практически линейное снижение значения ΔG . Хотя в реакции с участием 2 моль Na_2O скорость уменьшения энергии Гиббса выше, при использовании 1 моль Na_2O значение ΔG также остаётся отрицательным во всём исследованном температурном диапазоне. Это

свидетельствует о том, что восстановительная реакция с участием 1 моль Na_2O является более экономически эффективной.

На рисунке 2 представлено изменение разности энергии Гиббса (ΔG разн.) между восстановительными реакциями с участием 1 и 2 моль Na_2O при различных температурах.

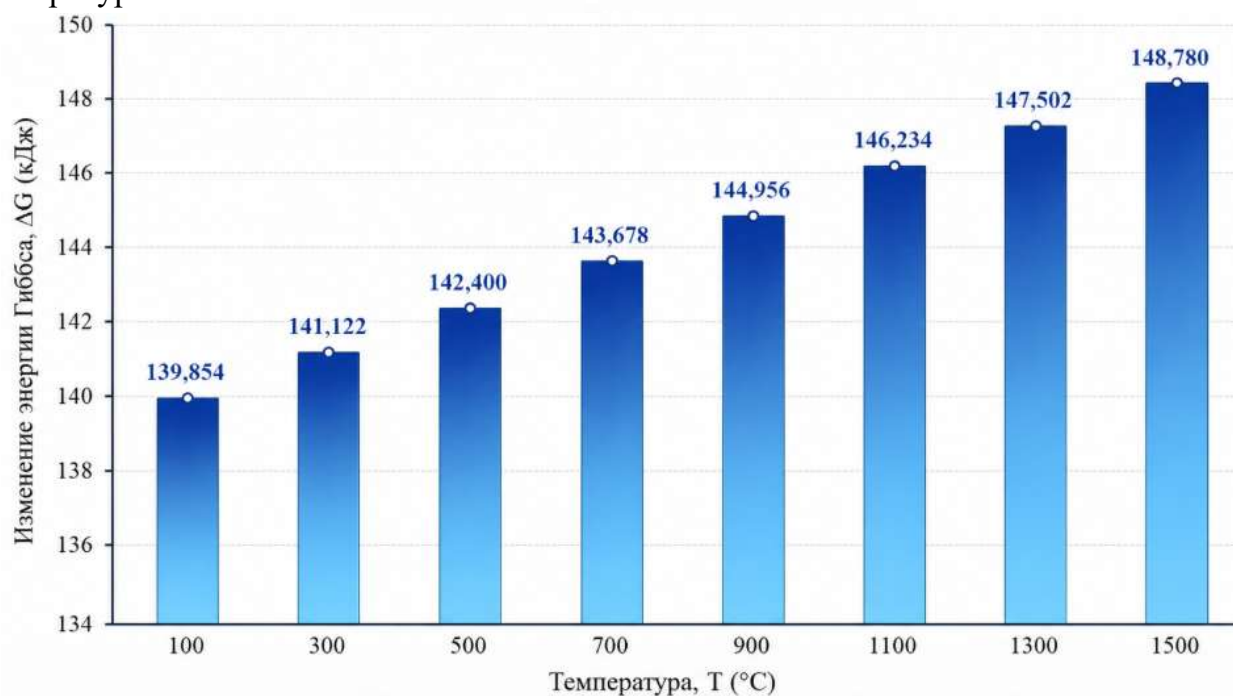


Рис. 2. Изменение разности энергии Гиббса реакций при использовании 1 и 2 моль оксида натрия в зависимости от температуры

На графике наблюдается увеличение разности энергии Гиббса (ΔG) с ростом температуры. При 100 °C значение ΔG составляет 139,854 кДж, тогда как при 1500 °C оно достигает 148,78 кДж. Это свидетельствует об увеличении термодинамического различия между реакциями с участием 2 и 1 моль Na_2O при высоких температурах.

С учётом повышения экономической эффективности процесса и предотвращения резких изменений основности шлака можно сделать вывод, что проведение реакции при высоких температурах с меньшим количеством Na_2O является как термодинамически, так и технологически обоснованным решением.

На рисунке 3 представлена зависимость константы равновесия (K_p) от температуры (T) для реакции с участием 1 моль Na_2O . Из графика видно, что с повышением температуры значение K_p постепенно уменьшается. Снижение константы равновесия

указывает на смещение равновесия реакции в сторону исходных веществ при высоких температурах, что затрудняет образование конечных продуктов.

В области низких температур (0–200 °С) наблюдается резкое снижение K_p . В среднем температурном интервале (200–800 °С) уменьшение продолжается, однако с меньшей интенсивностью. При температурах выше 1000 °С изменения становятся незначительными, и система приближается к состоянию устойчивого равновесия.

Постепенное снижение K_p с ростом температуры свидетельствует о том, что при высоких температурах для достижения равновесного состояния требуется больше времени. Практически неизменное значение K_p при температурах выше 1200 °С указывает на то, что в данном диапазоне условия равновесия реакции остаются практически постоянными. Это свидетельствует о существовании определённого температурного предела, выше которого термодинамические параметры реакции практически не изменяются.

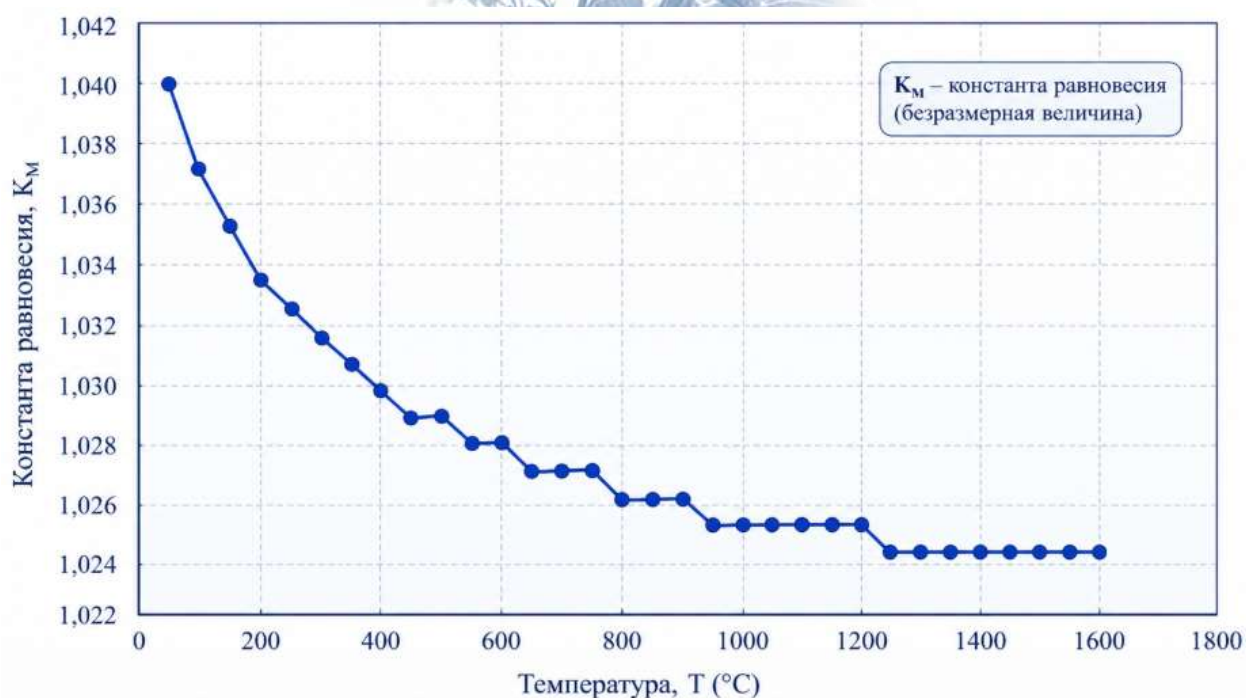


Рис. 3. Изменение константы равновесия реакции при использовании 1 моль оксида натрия в зависимости от температуры

В процессе карботермической переработки фаялита выбор оптимальной температуры должен осуществляться с учётом скорости реакции, условий плавления и изменения константы равновесия. Согласно результатам исследования, температура

плавления смеси 1 моль Fe_2SiO_4 и 1 моль Na_2O составляет приблизительно $1205\text{ }^\circ\text{C}$, и данное значение принимается в качестве нижней границы при определении оптимального температурного интервала. В результате реакции образуются чугуны с содержанием углерода 3–4 % (температура плавления $1150\text{--}1250\text{ }^\circ\text{C}$) и Na_2SiO_3 (температура плавления $874\text{ }^\circ\text{C}$) [19].

В расплавленной фазе процессы диффузии ускоряются, а число эффективных столкновений возрастает, что способствует более быстрому протеканию реакции при высоких температурах. Однако в реакции карботермического восстановления фаялита с участием 1 моль Na_2O наблюдается снижение константы равновесия с ростом температуры, что может отрицательно влиять на стабильность процесса при чрезмерно высоких температурах. В связи с этим оптимальный температурный интервал определен в пределах $1205\text{--}1300\text{ }^\circ\text{C}$, при этом рабочая температура рекомендуется на уровне примерно $1250\text{ }^\circ\text{C}$. В данном интервале обеспечивается максимальная эффективность реакции, создаются благоприятные условия для плавления компонентов и предотвращается резкое снижение константы равновесия. Поддержание указанной температуры способствует эффективному разделению чугуна и силикатного шлака, а также повышает общую эффективность процесса.

Вывод. Проведенный термодинамический анализ показал, что при карботермическом восстановлении фаялитсодержащих шлаков черной металлургии замена традиционного флюса CaO на Na_2O позволяет достичь значительно более высокой энергетической эффективности. Реакция с участием Na_2O является экзотермической и характеризуется отрицательными значениями свободной энергии Гиббса во всем температурном диапазоне, что подтверждает ее термодинамическое преимущество. Для промышленного применения оптимальная температура составляет около $1250\text{ }^\circ\text{C}$, при которой обеспечиваются стабильное плавление, эффективное разделение железоуглеродного сплава и шлака, а также равновесное протекание реакции. Снижение расхода Na_2O до 1 моль позволяет повысить экономическую целесообразность процесса без потери его эффективности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке энергосберегающих технологий извлечения железа из силикатных шлаков в черной металлургии.

Список использованной литературы

1. Колесников Ю. А., Бигеев В. А., Сергеев Д. С., Дудчук И. А. Возможность применения сидеритовой руды для выплавки конвертерной стали с повышенной долей чугуна в металлошихте // Черные металлы. 2017. № 6. С. 40–44.
2. Löf A., Ericsson M., Löf O. Iron ore market review // CIS Iron and Steel Review. 2019. Vol. 17. P. 4–9.
3. Пелевин А. Е. Повышение качества концентрата путем применения тонкого грохочения в стадиях измельчения железных руд // Черные металлы. 2023. № 10. С. 4–9.
4. Пелевин А. Е. Влияние магнитной флокуляции на результаты обогащения железосодержащих руд // Обогащение руд. 2021. № 4. С. 15–20.
5. Roshchin V. E. et al. Role of a silicate phase in the reduction of iron and chromium and their oxidation with carbide formation during the manufacture of carbon ferrochrome // Russian Metallurgy (Metally). 2016. Vol. 2016. No. 11. С. 1092–1099.
6. Khojiev S. T. Processing of copper slag using waste tires // Metallurgist. 2025. T. 68. No. 8. P. 1–10.
7. Hou Y., Yu J., Zheng D., Xu J., Ma G., Khojiev S., Kadirov N. Preparation and chromatic performance of black ceramic tiles from chromium slag, copper slag and silicon manganese slag // Journal of Ceramic Processing Research. 2025. T. 26. No. 1. P. 139–147.
8. Юсупходжаев А. А., Хожиев Ш. Т., Акрамов У. А. Использование нетрадиционных восстановителей для расширения ресурсной базы ОАО «Узметкомбинат» // Черные металлы. 2021. № 4. С. 4–8.
9. Клингер А., Альтендорфер А., Беттингер Д., Хьюз Г. Д., Аль-Хусейни А. А. и др. Система оптимизации технологического процесса нового поколения для установки прямого восстановления железа // Черные металлы. 2017. № 10. С. 19–27.
10. Темников В. В., Калимулина Е. Г., Тлеугабулов Б. С. Анализ образования и переработки металлургических отходов в АО «ЕВРАЗ НТМК» // Черные металлы. 2018. № 7. С. 32–37.
11. Romenets V. A., Valavin V. S., Pokhvisnev Y. V. Technological Assessment of the Romelt Process in the Classic and Two-Zone Variants // Metallurgist. 2014. No. 58. P. 20–27.
12. Комиссарова Л. Н., Рюмин М. А. Кальция силикаты // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2016); <https://old.bigenc.ru/chemistry/text/2037560>. Дата обращения: 11.02.2025

13. Долен М., Диркс К. Устойчивое ресурсосбережение благодаря использованию конвертерного шлака // Черные металлы. 2019. № 8. С. 37–41.

14. Шюлер С., Маркус Х. П., Алгермиссен Д., Мудерсбах Д. Качество электросталеплавильных шлаков // Черные металлы. 2015. № 9. С. 31–41.

15. Хожиев Ш.Т., Султонов Х.Ш., Кадиров Н.А., Гаибназаров С.Б. Усовершенствование технологии получения железорудного агломерата с использованием отходов полиэтилена // Черные металлы. 2024. № 10. С. 4–8.

16. Zhang H., Li B., Wei Y. et al. Effect of CaO on Copper Loss and Phase Transformation in Copper Slag // Metall. Mater. Trans. B. 2022. № 53. P. 1538–1551.

17. Третьяков Ю. Д. Твердофазные реакции. –М.: Химия, 1978. 360 с.

18. Хожиев Ш.Т., Холикулов Д.Б., Муталибхонов С.С., Шайманов И.И., Ма Г. Сравнительный термодинамический анализ флюсующих добавок Na₂O и CaO при восстановлении железа из силикатных шлаков черной металлургии // Черные металлы. – 2025. – № 9. – С. 12-18.

19. Adno Yu. L. World ferrous metallurgy: crisis around the turn of a new decade // Chernye Metally. 2020. № 7. P. 51–58.

