

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЙОДОМЕТРИЧЕСКОГО ТИТРОВАНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИЯ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. ЧАСТЬ 2. ЙОДИДЫ И КОНЦЕНТРИРОВАННАЯ КИСЛОТА

Ю.А. Король¹, U.Korol@mail.ru

О.А. Пачка²

В.А. Меньшиков³, Menshchikov_VA@umbr.ru

А.Д. Михайловских³, Mikhaylovskikh_AD@umbr.ru

¹ АО «Русская медная компания», Екатеринбург, Россия

² АО «Кыштымский медеэлектролитный завод» (АО «КМЭЗ»), Кыштым, Россия

³ АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия

Аннотация. В цветной металлургии для исследования теоретических вопросов по взаимодействию сульфидов и оксидов металлов при различном окислительном потенциале газовой среды использовали и продолжают использовать йодометрические методы для анализа газовой фазы.

В случае разложения йодидов с образованием молекулярного йода под воздействием окислителей происходит постоянное и противонаправленное изменение состава раствора под воздействием света, кислорода воздуха, температуры, времени взаимодействия, концентрации растворов, условий контакта с внешней средой, способом и количеством вводимого индикатора, что не позволяет достоверно фиксировать точное количество молекулярного йода в растворе при взаимодействии с серосодержащими элементами исследуемой газовой среды.

В связи с этим проведение исследований по изучению материалов с выделением в газовую фазу серосодержащих соединений с фиксацией их качественного и количественного состава с использованием растворов йода в йодидах – не целесообразно.

Ключевые слова: йодометрия, йод, тиосульфат натрия, серная кислота, крахмал, титр, грамм-эквивалент, титрование, молярная концентрация, нормальная концентрация, фиксанал йода

Для цитирования: Некоторые особенности йодометрического титрования при изучении пирометаллургических процессов. Часть 2. Йодиды и концентрированная кислота / Ю.А. Король, О.А. Пачка, В.А. Меньшиков, А.Д. Михайловских // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2026. Т. 26, № 2. С. 17–27. DOI: 10.14529/met260202

Original article
DOI: 10.14529/met260202

SOME FEATURES OF IODOMETRIC TITRATION IN THE STUDY OF PYROMETALLURGICAL PROCESSES. PART 2. IODIDES AND CONCENTRATED ACID

Yu.A. Korol¹, U.Korol@mail.ru

O.A. Pachka²

V.A. Menshikov³, Menshchikov_VA@umbr.ru

A.D. Mikhaylovskikh³, Mikhaylovskikh_AD@umbr.ru

¹ JSC Russian Copper Company, Ekaterinburg, Russia

² JSC Kyshtym Copper Electrolyte Plant (JSC KMEZ), Kyshtym, Russia

³ JSC Uralmexhanobr, Ekaterinburg, Russia

Abstract. In non-ferrous metallurgy, iodometric methods for gas phase analysis have been and continue to be used to study theoretical issues related to the interaction of metal sulfides and oxides under varying oxidation potentials of gas environment.

When iodides decompose to form molecular iodine under the influence of oxidizing agents, the solution composition undergoes constant and opposing changes under the influence of light, oxygen, temperature, interaction time, solution concentration, conditions of contact with the external environment, and the method and amount of indicator introduced. This prevents the reliable determination of the exact amount of molecular iodine in the solution during interaction with sulfur-containing elements of the gas environment under study.

Therefore, when conducting research on materials involving the release of sulfur-containing compounds into the gas phase and record their qualitative and quantitative composition using iodine solutions in iodides – is impractical.

Keywords: iodometry, iodine, sodium thiosulfate, sulfuric acid, starch, titre, gram equivalent, titration, molar concentration, normal concentration, iodine fixanal

For citation: Korol Yu.A., Pachka O.A., Menshikov V.A., Mikhaylovskikh A.D. Some features of iodometric titration in the study of pyrometallurgical processes. Part 2. Iodides and concentrated acid. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2026;26(2):17–27. (In Russ.) DOI: 10.14529/met260202

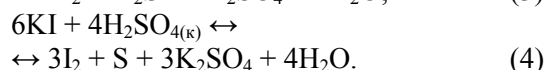
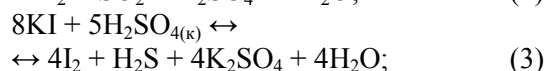
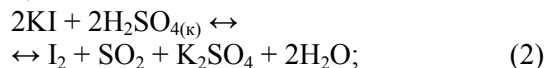
С учётом противоречивости результатов исследований пирометаллургических процессов между сульфидами и оксидами металлов с использованием растворов йодидов для анализа газовой фазы при высоких температурах (до 673 К) и в течение длительного периода (0,5–6 ч) [1–9] авторы продолжили исследовательские работы по изучению влияния условий экспериментов на достоверность получаемых результатов. Особенностью рассматриваемых исследований являлось то, что при их реализации изучался ход, эффективность и направление реакций с участием оксидов и сульфидов металлов по изменяемому количеству йода в растворе, который взаимодействовал с серосодержащими продуктами газовой фазы и позволял фиксировать результат при последующем титровании.

В первой части работы [10] на первой и второй стадиях было изучено влияние на состав растворов йодидов при контакте с разбавленной серной кислотой температуры, времени опыта, способа ввода в раствор индикатора, концентрации йодида. Полученные результаты убедительно показали, что для рассматриваемых условий растворы йодидов разлагаются с образованием йода молекулярного, что приводит к искажению оценки результатов взаимодействия газовой фазы с сернистыми соединениями и влияет на представительность выводов о ходе исследуемого процесса.

В ходе большинства рассматриваемых исследований по изучению реакций взаимодействия сульфидов и оксидов металлов лежит реакция между диоксидом серы и йодом с расходом последнего, что позволяет судить о степени десульфидирования исходных продуктов по реакции



Для изучения поведения йода в растворах йодидов в рамках представленных опытов его первоначальное образование осуществляли не за счёт разложения йодида на свету или окисления кислородом воздуха при температуре выше комнатной в течение длительного времени [10], а с использованием концентрированной серной кислоты, которая приводила к окислению йодида до молекулярного йода с образованием диоксида серы и/или сероводорода, и/или серы элементной по следующим реакциям:



Образование комплексного соединения KI_3 по реакции



и удаление газообразных продуктов соединений серы позволяет получать раствор содержащий молекулярный йод, и качественно оценить его поведение при заданных параметрах исследований.

Цель исследования: анализ достоверности выводов научно-исследовательских работ по изучению взаимодействия сульфида железа и магнетита при температурах от 298 до 1500 К и длительном времени проведения экспериментов с использованием растворов йода для контроля и оценки результатов опыта.

Материалы и методы исследования

При оценке влияния на растворы йода условий проведения экспериментов на втором

этапе третьей стадии были рассмотрены следующие параметры:

- температура раствора;
- время проведения эксперимента;
- количество и время дозировки индикатора;
- количество и время дозировки крепкой серной кислоты для образования йода при разложении йодида калия.

Оценка результатов опытов проводилась с помощью контроля изменения цвета растворов и по количеству молекулярного йода в растворе, образующемуся в ходе эксперимента с йодидом, определяемому методом прямого титрования тиосульфатом натрия.

В качестве реагентов использовались: 0,057 н раствор тиосульфата натрия; 0,1 н раствор свежеприготовленного йодида калия; концентрированная 98%-ная серная кислота, крахмал 1%-ный.

Два литра 0,1 н раствора йодида калия готовили следующим образом: 33,2 г навески калия йодистого ХЧ по ГОСТ 4232–74 датой выпуска 10.2024 г. растворяли в 500 мл воды с последующим доведением до 2 л.

При исследовании раствор KI в объёме 50 мл заливали в колбу, подогревали до заданной температуры, окисляли 3 мл концентрированной серной кислоты, добавляли определённую порцию крахмала, после чего выдерживали в течение установленного времени. В ходе эксперимента фиксировалось изменение цвета раствора и по завершении – концентрация молекулярного йода в растворе.

Все результаты опытов представлены в табл. 1.

На рис. 1 показаны колбы № 9, 14, 15 и 17 с раствором йодида калия после завершения опыта (через 90 мин) с предварительной добавкой крахмала в качестве индикатора йода.

Таблица 1

Нагрев 0,1 н раствора йодида калия (третья серия)

Table 1

Heating 0.1 N potassium iodide solution (third series)

0,057 н Na ₂ S ₂ O ₃	№ колбы			
	9	14	15	17
T раствора, °C	25	50	70	90
V раствора йодида, мл	50	50	50	50
Крахмал, мл	20	20	30	30
H ₂ SO _{4(к)} , мл	3	3	3	3
C _{нач} I ₂ , г/л	0,000	0,000	0,000	0,000
0 мин	Фиолетовый	Темно-фиолетовый	Без цвета	Без цвета
10 мин	Фиолетовый	Темно-фиолетовый	Фиолетовый	Синий
20 мин	Фиолетовый	Темно-фиолетовый	Темно-фиолетовый (рис. 2)	Жёлтый оттенок + 10 мл крахмала (рис. 2)
30 мин	Фиолетовый	Темно-фиолетовый	Темно-фиолетовый	Синий
40 мин	Фиолетовый	Темно-фиолетовый	Темно-фиолетовый	Синий
50 мин	Фиолетовый	Темно-фиолетовый	Темно-фиолетовый	Фиолетовый
60 мин	Фиолетовый	Темно-фиолетовый	Темно-фиолетовый	Фиолетовый
70 мин	Фиолетовый	Темно-фиолетовый	Темно-фиолетовый	Фиолетовый
80 мин	Фиолетовый	Темно-фиолетовый	Темно-фиолетовый	Темно-фиолетовый
90 мин (рис. 1)	Фиолетовый	Темно-фиолетовый	Темно-фиолетовый	Темно-фиолетовый
C _{конеч} I ₂ , г/л	0,0144	0,2023	0,0433	0,0361

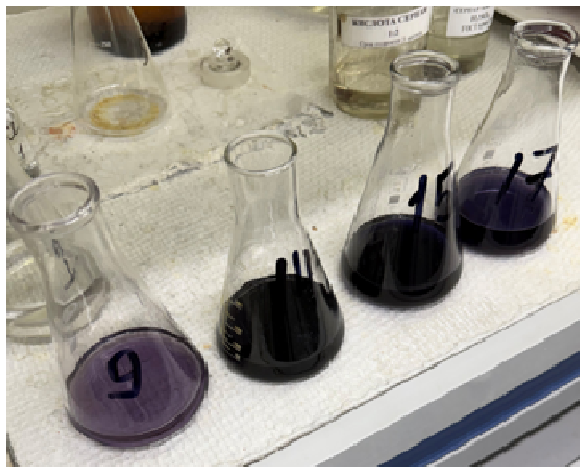


Рис. 1. Цвет KI через 90 мин в колбах № 9, 14, 15 и 17
Fig. 1. KI colour after 90 min in flasks No. 9, 14 and 17



Рис. 2. Цвет KI через 20 мин в колбах № 15 и 17
Fig. 2. KI colour after 20 min in flasks No. 15 and 17

Во всех колбах было установлено наличие молекулярного йода как по цвету раствора с индикатором, так и по результатам титрования тиосульфатом натрия (см. табл. 1).

На рис. 2 показано изменение цвета раствора в колбах № 15 и 17 через 20 мин после начала опыта.

В четвертой серии опытов с йодидом и йодом были рассмотрены следующие изменяемые параметры:

- температура раствора;
- время проведения эксперимента от окисления раствора крепкой серной кислотой после достижения заданной температуры;
- исключено влияния добавок крахмала в начале опыта на ход реакции.

В ходе эксперимента фиксировалось изменение цвета и объема раствора, концентрация молекулярного йода через каждые 15 мин опыта.

В качестве реагентов использовались: 0,038 н раствор тиосульфата натрия; 0,1 н раствор свежеприготовленного йодида калия; концентрированная серная кислота в соотношении к воде 1 : 1, крахмал 1%-ный.

Оценка результатов проводилась по изменению цвета растворов и по количеству молекулярного йода в растворе, образующегося в ходе эксперимента, определяемому методом прямого титрования тиосульфатом натрия.

При исследовании раствор KI в объеме 50 мл заливали в колбу, нагревали до заданной температуры, окисляли крепкой серной кислотой и выдерживали на печи в течение установленного времени, поддерживая температуру раствора в колбе.

В связи с недостаточностью раствора для последующего отбора аликвот и анализа титрованием исходное количество раствора в колбах № 2, 3 и 4 увеличили до 70 мл. Крахмал в качестве индикатора добавляли только на стадии йодометрического титрования.

На рис. 3 продемонстрирован цвет раствора йодида калия в четвертой серии опытов в колбах № 1, 2, 3 и 4 без добавления крахмала через 60 мин после начала эксперимента. Все результаты по этой серии представлены в табл. 2.

Учитывая то, что ряд исследователей [7, 8] изучали реакции взаимодействия между сульфидами и оксидами металлов при температурах выше 1500 К, а это приводило к формированию газовой фазы, поступающей в установку с растворами йода без предварительного охлаждения газа при температурах выше 673 К и сопровождалось резкими тепловыми ударами, приводящими к кипению раствора в месте их контакта, то это, в свою очередь, потребовало качественной оценки влияния высоких температур газа на состав растворов йодидов и йода. С этой целью был проведен ряд опытов, где в раствор с йодидом погружался предварительно нагретый до красного каления (600–800 К) металлический стержень и фиксировались результаты эксперимента.

В ходе этого пятого эксперимента¹ в 300 мл 0,1 н раствора KI, нагретого до 25 °С,

¹ В работе принимали участие Кушнова Ю.М. – инженер-лаборант аналитической лаборатории АО «Карабашмедь», и Маркина К.В. – инженер-лаборант лаборатории физико-химических методов анализа АО «Карабашмедь».

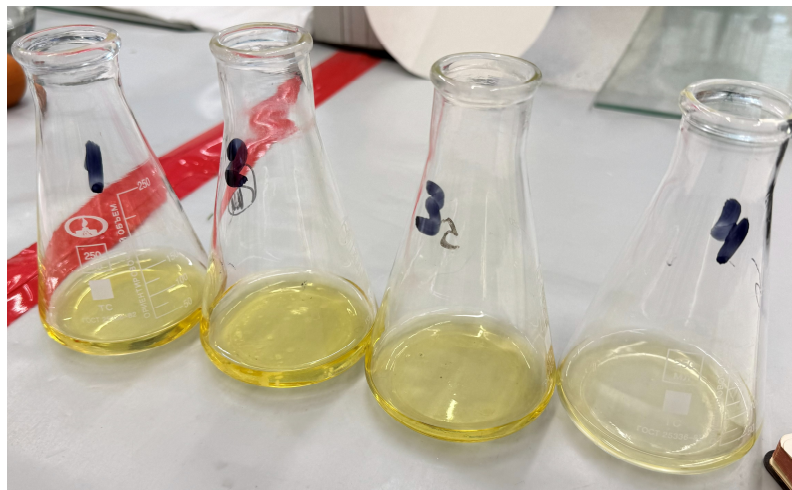


Рис. 3. Цвет KI через 60 мин в четвертой серии
Fig. 3. KI colour after 60 min in the fourth series

Нагрев 0,1 н раствора йодида калия (четвёртая серия)

Таблица 2

Heating 0.1 N potassium iodide solution (fourth series)

Table 2

0,038 н $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$		№ колбы			
		1	2	3	4
T раствора, °C		25	40	70	96
V раствора йодида, мл		50	70	70	70
$\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{к})}$, мл		3	3	3	3
$C_{\text{нач}} \text{I}_2$, г/л		0,000	0,000	0,000	0,000
0 мин		Без цвета	Без цвета	Без цвета	Без цвета
15 мин		Светло-соломенный	Соломенный	Жёлтый	Соломенный
30 мин		Соломенный	Соломенный	Соломенный	Соломенный
45 мин		Светло-соломенный	Соломенный	Жёлтый	Светло-соломенный
60 мин		Светло-соломенный	Светло-Соломенный	Соломенный	Светло-соломенный
$C \text{I}_2$, г/л	0 мин	0,000	0,000	0,000	0,000
	15 мин	0,020	0,038	0,058	0,048
	30 мин	0,048	0,069	0,086	0,069
	45 мин	0,048	0,096	0,086	0,058
	60 мин	0,038	0,117	0,066	0,038
V остаток раствора йодида, мл	0 мин	53	73	73	73
	15 мин	47	65	61	60
	30 мин	41	57	49	46
	45 мин	35	48	36	31
	60 мин	29	42	30	25

для подкисления добавляли 10 мл разбавленной серной кислоты, опускали нагретый стержень и после этого добавляли 10 мл крахмала (рис. 4).

Сразу после введения стержня наблюдалось выделение из раствора и осаждение йода в виде мелких темных чешуек, после добав-

ления крахмала фиксировался йод молекулярный и опускание его на дно колбы в виде фиолетовых струй (рис. 5).

Концентрация йода при титровании раствора 0,057 н тиосульфатом натрия составила 0,029 г/л.

Повторение опыта с введением крахмала

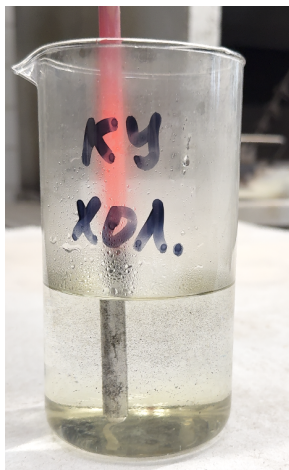


Рис. 4. Цвет KI при опускании в раствор горячего металлического стержня и выделение чешуек йода
Fig. 4. KI colour when putting a hot metal rod inside the solution and precipitating of iodine particles

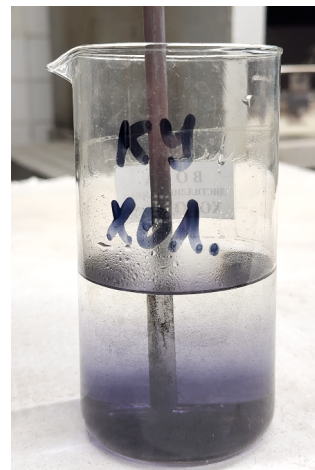


Рис. 5. Выделение молекулярного йода при разложении йодида калия
Fig. 5. Generating molecular iodine when KI decomposes



Рис. 6. Выделение молекулярного йода при разложении KI при добавлении крахмала после введения стержня в раствор
Fig. 6. Generating molecular iodine when KI decomposes with adding starch after putting the rod inside the solution

до погружения в раствор стержня показало содержание молекулярного йода 0,003 г/л.

При предварительном нагреве раствора йодида калия до 90 °С и введение 10 мл крахмала до погружения в раствор горячего стержня содержание молекулярного йода в растворе снизилось практически до нуля, а на дне колбы наблюдался плотный осадок чешуйчатого йода, раствор после отстоя был бесцветный.

Добавление крахмала после помещения в раствор йодида, нагретого до 90 °С, горячего стержня приводило к образованию струй молекулярного йода, осаждающихся на дно колбы, и пожелтению раствора через 20 мин от начала эксперимента (рис. 6).

Концентрация молекулярного йода в растворе в этом случае составляла 0,1 г/л.

Обсуждение результатов

Рассматривая результаты исследований в третьей серии опытов, отметим, что через 90 мин максимальное содержание йода 0,2023 г/л наблюдается для опыта с температурой 50 °С (рис. 7). При температуре 70 °С концентрация йода равна 0,0433 г/л, для 90 °С она составляет 0,0361 г/л. Минимальное содержание йода характерно для комнатной температуры – 0,0144 г/л. В четвертой серии опытов было исследовано поведение йода внутри заданного временного интервала через каждые 15 мин.

Обобщив результаты по этой серии опытов и составив графики изменения концентраций йода, приходим к выводу, что для температур 25, 70 и 96 °С концентрация йода моно-

тонно увеличивается в первые 30–45 мин, а затем снижается (для температур 70, 96 °С) или становится постоянной для комнатной температуры (рис. 8). Для 40 °С в рассматриваемом интервале времени характерно постоянное увеличение концентрации молекулярного йода, что, по-видимому, вызвано преобладанием обратимой реакции по разложению йодида с образованием молекулярного йода в сравнении с его испарением и удалением из раствора.

Для температуры 96 °С концентрация йода имеет максимум для первых 30 мин исследования и затем снижается до минимальных значений.

Для исключения влияния на концентрацию йода уменьшающегося объема раствора за счёт испарения в основном воды, был вы-

полнен оценочный расчёт количества йода, остающегося в колбе, результаты которого представлены на рис. 9, вместо фактического количества йода в колбе № 1 из-за несопоставимости сравниваемых объёмов растворов (см. табл. 2).

Из графика на рис. 9 следует, что для всех температур раствора в указанном временном интервале наблюдается рост количество йода в растворе в первые 15–30 мин с последующим снижением до минимальных значений.

Для температуры 40 °С максимальное значение йода в растворе достигается в интервале 60 и более минут.

Представленные результаты позволяют утверждать, что помимо процессов, связанных с разложением йодида под воздействием света и кислорода воздуха, в растворах йода

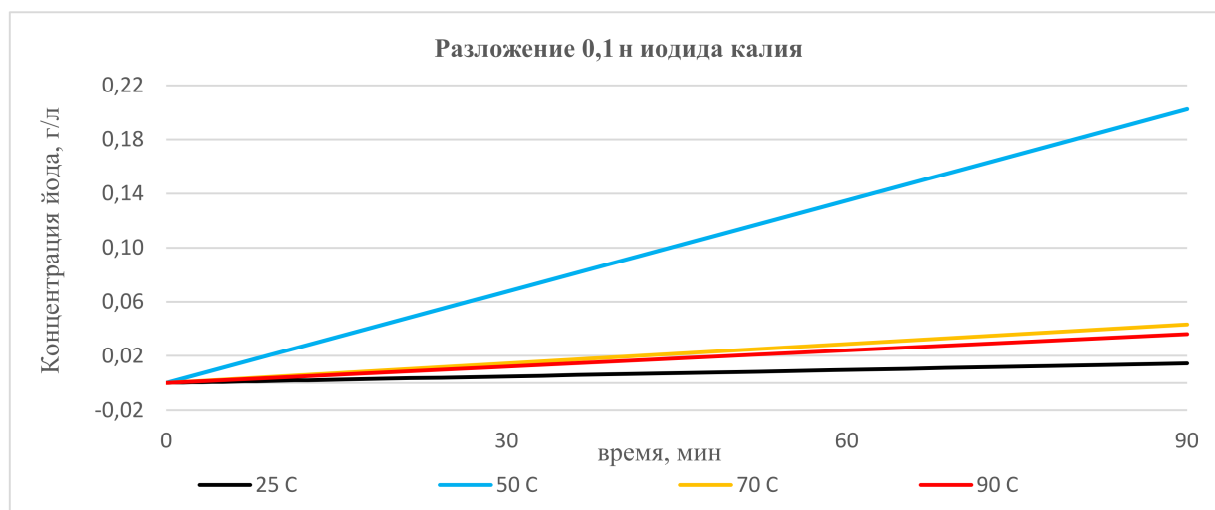


Рис. 7. Изменение концентрации I_2 с ростом температуры за 90 мин
Fig. 7. Change in I_2 concentration with increasing temperature over 90 min

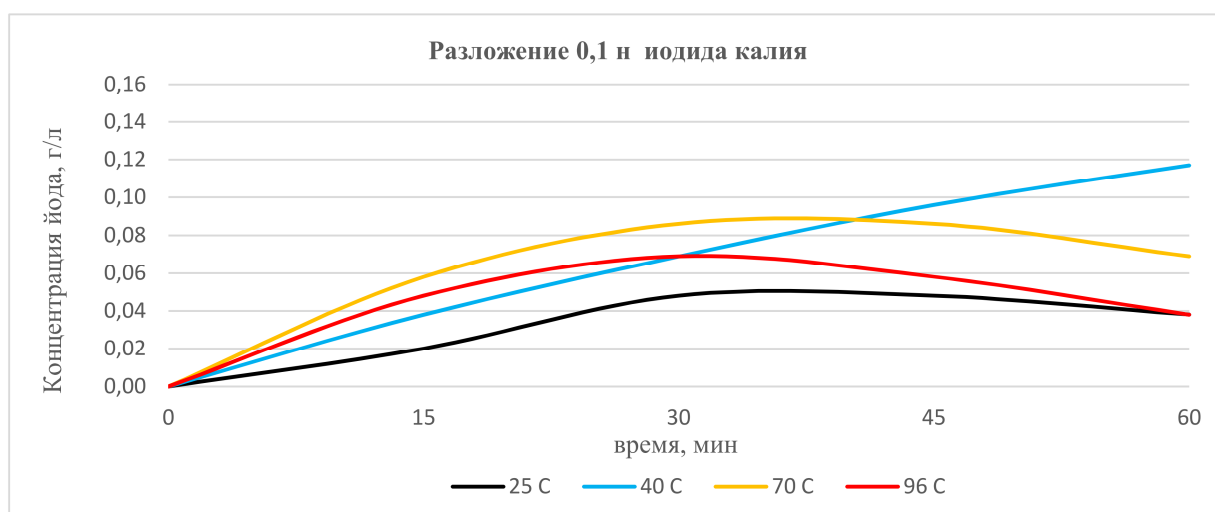


Рис. 8. Изменение концентрации I_2 с ростом температуры и времени
Fig. 8. Change in I_2 concentration with increasing temperature and time

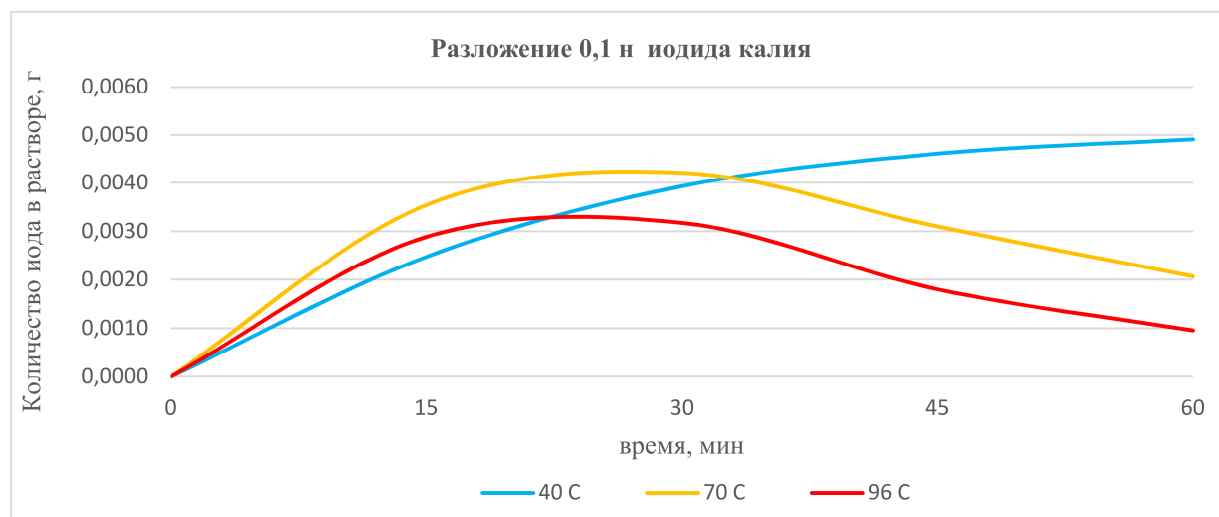


Рис. 9. Изменение количества I_2 с ростом температуры и времени опыта
Fig. 9. Change in I_2 amount with increasing temperature and time

в йодиде одновременно реализуются и находятся в равновесии ещё четыре процесса:

- первый (обратимый) – образование молекулярного йода I_2 по реакциям (2), (3) и (4), ускоряющийся с ростом температуры;
- второй – испарение воды и повышение концентрации йодида KI, что приводит к росту скорости образования йода;
- третий – увеличение концентрации I_2 в растворе, влияющее на равновесные реакции по первому процессу;
- четвёртый – испарение молекулярного йода, увеличивающееся по мере роста температуры раствора и влияющее на равновесие реакций по первому и третьему процессам.

В первые 15–30 мин растёт концентрация и количество образующегося йода в растворе (рис. 8 и 9) из-за разложения йодида и испарения воды, далее рост концентрации и количества йода замедляется в связи с преобладанием процесса испарения йода, несмотря на продолжающееся испарение воды и образование йода.

В связи с обратимостью равновесных реакций, их взаимным влиянием на исходные и конечные продукты при рассматриваемой методике проведения исследовательских работ мы можем только фиксировать преобладание скорости одной группы процессов над другой, наблюдая за изменением концентрации йода в растворе и его цвета.

При рассмотрении методик экспериментов с сульфидными металлами и контролем за выделяющимися соединениями серы [4–6, 9], как правило, индикатор (крахмал) добавляют в исследуемую систему перед началом экспе-

римента в количестве, рассчитанном на весь опыт. В предыдущей работе [10] было показано, что предварительная дозировка крахмала искажает (занижает) результаты по определению концентрации соединений серы в газовой фазе. Аналогичное влияние было получено в третьей серии опытов (см. табл. 1), где при повышенных температурах фиксировалось разрушение крахмала и изменение цвета раствора за счёт высвобождения молекулярного йода. Подобное явление было зафиксировано и в опыте с горячим стержнем и погружением его в раствор. При условии предварительной дозировки индикатора в количествах, в разы превышающих его требуемую величину в качестве индикатора, наблюдалось связывание йода в клатраты [11–16], при разрушении крахмала под действием высокой температуры йод оставался в виде чешуек на дне колбы. Добавление крахмала после введения в раствор горячего стержня и выпадения большей части йода в виде твёрдой фазы показывает значимые остаточные количества йода в растворе.

Опыты с горячим стержнем продемонстрировали, что при контакте горячей среды при температурах выше 600 К с растворами йода или йодидов происходит их разложение с выделением йода как в твёрдой фазе (в форме чешуек), так и в молекулярной форме.

Заключение

В цветной металлургии для исследования теоретических вопросов по взаимодействию сульфидов и оксидов металлов при различном

окислительном потенциале газовой среды использовали и продолжают использовать йодометрические методы для анализа газовой фазы. При этом применяемые методики не всегда жёстко регламентируют температуру, время, концентрации веществ и другие параметры с точки зрения влияния их на достоверность получаемых результатов.

Как в случае разложения йодидов под воздействием света и кислорода воздуха, так и в случаях образования молекулярного йода под воздействием окислителей происходит постоянное и противонаправленное изменение состава раствора под воздействием света, кислорода, температуры, времени взаимодействия, концентрации растворов, условий контакта с внешней средой, способом и количеством вводимого индикатора, что не позволяет достоверно фиксировать точное количество молекулярного йода в растворе при взаимодействии с серосодержащими элементами исследуемой газовой среды.

Анализ полученных данных в проведённых опытах показал, что температура раствора, концентрация йодида, время проведения эксперимента существенно и значимо влияют на достоверность получаемых результатов, искажая выводы и теоретические обобщения.

В связи с этим проведение исследований по изучению материалов с выделением в газовую фазу серосодержащих соединений с фиксацией их качественного и количественного состава с использованием растворов йода в йодидах не целесообразно.

Опыт получения чешуйчатого йода с использованием предварительно нагретых материалов до температур 600 К и выше и погружением их в растворы йодидов позволяет рекомендовать его как альтернативу лабораторному получению йода путём нагрева растворов йодидов до температур кипения и осаждения испаряющегося молекулярного йода на холодных поверхностях с последующим снятием осадка.

Список литературы

1. Король Ю.А. Медно-серная плавка. Освоение и совершенствование, достоинства и недостатки. В 2 т. Т. 2: Медно-серная плавка. Совершенствование, достоинства и недостатки. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2022. 432 с. (Металлургия в лицах).
2. Бабаджан А.А. Пирометаллургическая селекция. М.: Metallurgia, 1968. 296 с.
3. Король Ю.А. Аусмелт. В 4 т. Т. 3: Теория и модели расчёта. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2024. 360 с.
4. Вольский А.Н. Основы теории металлургических плавков. М.: Metallurgizdat, 1943. 220 с.
5. Газарян Л.М. Пирометаллургия меди. М.: Metallurgia, 1969. 358 с.
6. Вольский А.Н., Аграчева Р.А. Взаимодействие сульфидов железа и меди с магнетитом // Труды Московского института цветных металлов и золота. № 11 «Интенсификация процессов в металлургии цветных металлов». М.: Metallurgizdat, 1945.
7. Москович А.Г., Ванюков В.А. Интенсификация комбинированного процесса медно-серной плавки // Труды Московского института цветных металлов и золота. 1954. № 24.
8. Абдеев М.А. Полиметаллические штейны и их конвертирование. Алма-Ата: Издательство академии наук Казахской ССР, 1962. 228 с.
9. Мостович В.Я., Анисимов С.М. Металлургия свинца. М.; Л.: Metallurgizdat, 1940. 384 с.
10. Некоторые особенности йодометрического титрования при изучении пирометаллургических процессов. Часть 1. Йодиды и разбавленная кислота / Ю.А. Король, О.А. Пачка, В.А. Меньшиков, А.Д. Михайловских // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2026. Т. 26, № 2. С. 5–16. DOI: 10.14529/met260201
11. Менделеев Д.И. Основы химии. М.; Л.: Госхимтехиздат, 1932. Т. 1. 488 с.
12. Свойства элементов: справ.: в 2 кн. / М.Е. Дриц, А.М. Дриц, П.Б. Будберг и др.; под общ. ред. М.Е. Дрица. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издат. дом «Руда и металлы», 2003. Кн. 2. 456 с.
13. Лидин Р.А., Молочко В.А., Андреева Л.Л. Неорганическая химия в реакциях: справ. / под ред. Р.А. Лидина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Дрофа, 2007. 637 с.
14. CRC Handbook of Chemistry and Physics / Lide D.R. (Ed.). 89th Edition. Taylor and Francis Group, LLC, 2009.

15. Руководство по неорганическому синтезу: в 6 т.: пер. с нем. / Ф. Губер, М. Шмайсер, П.В. Шенк и др.; под ред. Г. Брауэра. М.: Мир, 1985. Т. 2. 338 с.
16. Шапиро С.А. Количественный анализ. 2-е изд. М.;Л.: Госхимиздат, 1953. 172 с.

References

1. Korol Yu.A. *Medno-sernaya plavka. Osvoenie i sovershenstvovanie, dostoinstva i nedostatki. V 2 t. T. 2: Medno-sernaya plavka. Sovershenstvovanie, dostoinstva i nedostatki* [Copper-Sulphur Smelting. Development and Improvement, Advantages and Disadvantages. In 2 volumes. Vol. 2. Copper-Sulphur Smelting. Improvement, Advantages and Disadvantages]. Ekaterinburg: AMB Publ., 2022. 432 p. (Metallurgy in Persons). (In Russ.)
2. Babadzhan A.A. *Pirometallurgicheskaya selektsiya* [Pyrometallurgical selection]. Moscow: Metallurgiya, 1968. 296 p. (In Russ.)
3. Korol Yu.A. *Ausmelt. V 4 t. T. 3: Teoriya i modeli rascheta* [Ausmelt. In 4 volumes. Vol. 3: Theory and Calculation Models]. Ekaterinburg: AMB Publ., 2024. 360 p. (In Russ.)
4. Vol'skiy A.N. *Osnovy teorii metallurgicheskikh plavok* [Fundamentals of the Theory of Metallurgical Smelting]. Moscow: Metallurgizdat, 1943. 220 p. (In Russ.)
5. Gazaryan L.M. *Pirometallurgiya medi* [Pyrometallurgy of Copper]. Moscow: Metallurgiya, 1969. 358 p. (In Russ.)
6. Volsky A.N., Agracheva R.A. [Interaction of Iron and Copper Sulfides with Magnetite]. In: *Proceedings of the Moscow Institute of Non-Ferrous Metals and Gold*. No. 11 "Intensification of Processes in Non-Ferrous Metallurgy". Moscow: Metallurgizdat, 1945. (In Russ.)
7. Moskovich A.G., Vanyukov V.A. [Intensification of the Combined Process of Copper-Sulfur Smelting]. In: *Proceedings of the Moscow Institute of Non-Ferrous Metals and Gold*. 1954. No. 24. (In Russ.)
8. Abdeev M.A. *Polimetallicheskie shteyny i ikh konvertirovanie* [Polymetallic Mattes and Their Conversion]. Alma-Ata: Publishing House of the Academy of Sciences of the Kazakh USSR, 1962. 228 p. (In Russ.)
9. Mostovich V.Ya., Anisimov S.M. *Metallurgiya svintsa* [Metallurgy of Lead]. Moscow; Leningrad: Metallurgizdat, 1940. 384 p. (In Russ.)
10. Korol Yu.A., Pachka O.A., Menshikov V.A., Mikhaylovskikh A.D. Some features of iodometric titration in the study of pyrometallurgical processes. Part 1. Iodides and diluted acid. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2026;26(2):5–16. (In Russ.) DOI: 10.14529/met260201
11. Mendeleev D.I. *Osnovy khimii* [Fundamentals of Chemistry]. Moscow; Leningrad: Goskhimtekhnizdat, 1932. Vol. 1. 488 p. (In Russ.)
12. Drita M.E., Drita A.M., Budberg P.B., Kuznetsov N.T., Panovko V.M. *Svoystva elementov: spravochnik: v 2 kn. Kn. 2* [Properties of the Elements: Reference Edition. In 2 books. Book 2]. 3rd ed., revised. Moscow: Publishing House "Ruda i metally", 2003. 456 p. (In Russ.)
13. Lidin R.A., Molochko V.A., Andreeva L.L. *Neorganicheskaya khimiya v reaktsiyakh: spravochnik* [Inorganic Chemistry in Reactions: Handbook]. 2nd ed., revised. Moscow: Drofa, 2007. 637 p. (In Russ.)
14. Lide D.R. (Ed.). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 89th Edition. Taylor and Francis Group, LLC, 2009.
15. Huber F., Schmeisser M., Schenk P.W., Feher F., Steudel R., Klement R.; Brauer G. (Ed.). *Rukovodstvo po neorganicheskomu sintezu: v 6 t. T. 2*. [Handbook of Inorganic Synthesis: In 6 volumes. Vol. 2]. Transl. from German. Moscow: Mir, 1985. 338 p. (In Russ.)
16. Shapiro S.A. *Kolichestvennyy analiz* [The Mass Analysis]. 2nd ed. Moscow; Leningrad: Goskhimtekhnizdat, 1953. 172 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Король Юрий Александрович, канд. техн. наук, инженер, АО «Русская медная компания», Екатеринбург, Россия; U.Korol@mail.ru.

Пачка Ольга Александровна, инженер, старший лаборант химического анализа, ЦЗЛ, АО «Кыштымский медэлектrolитный завод» (АО «КМЭЗ»), Кыштым, Россия.

Меньшиков Викентий Алексеевич, канд. техн. наук, начальник сектора пирометаллургии, АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия; Menshchikov_VA@umbr.ru.

Михайловских Антон Дмитриевич, инженер, АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия; Mikhaylovskikh_AD@umbr.ru.

Information about the authors

Yuriy A. Korol, Cand. Sci. (Eng.), Engineer, JSC Russian Copper Company. Ekaterinburg, Russia; U.Korol@mail.ru.

Olga A. Pachka, Engineer, Senior Chemistry Lab Technician, Central Laboratory, JSC Kyshtym Copper Electrolyte Plant (JSC KMEZ), Kyshtym, Russia.

Vikentiy A. Menshikov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Pyrometallurgy Sector, JSC Uralmekhanobr, Ekaterinburg, Russia; Menshchikov_VA@umbr.ru.

Anton D. Mikhaylovskikh, Engineer, JSC Uralmekhanobr, Ekaterinburg, Russia; Mikhaylovskikh_AD@umbr.ru.

Статья поступила в редакцию 10.04.2026

The article was submitted 10.04.2026