

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ В РЕАКЦИЯХ ЖИДКОФАЗНОГО ОКИСЛЕНИЯ СУЛЬФИТА НАТРИЯ

А. Б. Кадырова, А. Г. Маркабаева, Ж. Т. Ешова, Ж. К. Каирбеков, Д. Н. Акбаева

STUDY OF HUMIC ACIDS CATALYTIC PROPERTIES IN REACTIONS OF SODIUM SULFITE LIQUID-PHASE OXIDATION

A. B. Kadyrova, A. G. Markabaeva, Zh. T. Eshova, Zh. K. Kairbekov, D. N. Akbayeva

Работа выполнена по гранту МОН РК № 505, по приоритету 5.1. «Фундаментальные исследования в области естественных наук», по программе "Разработать научные основы переработки горючих ископаемых и получения новых материалов.

Предметом исследования является модельная реакция окисления сульфита натрия до сульфата натрия кислородом в мягких условиях ($T = 30-60^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{O}_2} = 1$ атм) в водных средах в присутствии хлоридов меди(II) и железа(III), модифицированных гумусовыми кислотами. Целью работы является разработка новых эффективных гомогенных катализаторов жидкофазного окисления сульфита натрия в водной среде для очистки отходящих газов от диоксида серы. Методами кинетики, волнометрии, редокс-потенциометрии, ИК-спектроскопии, гравиметрии исследованы кинетика, механизм, промежуточные и конечные продукты, определены оптимальные условия, кинетические и активационные параметры реакции жидкофазного окисления Na_2SO_3 кислородом в водных средах. Изучено влияние концентраций реагентов (хлорной меди, хлорного железа, гумусовой кислоты, жёлтого фосфора) и температуры на скорость реакций. Обнаружена каталитическая активность хлоридов меди и железа на скорость окисления сульфита натрия кислородом в водных растворах до сульфата натрия. Оптимальные условия реакции и хороший выход сульфата натрия достигаются при 60°C при мольном соотношении реагентов $[\text{FeCl}_3]:[\text{Na}_2\text{SO}_3] = (0,1:1,0)$ и $[\text{CuCl}_2]:[\text{Na}_2\text{SO}_3]:[\text{HГум}] = (0,129:1,0:0,005)$. Рассчитаны кинетические и активационные параметры и установлено, что изученные процессы протекают по окислительно-восстановительному механизму и состоят из двух ключевых стадий: восстановления Cu(II) и Fe(III) сульфитом натрия до Cu(0) и Fe(I) с образованием сульфата натрия и окисления Cu(I) до Cu(II) , Fe(II) до Fe(III) кислородом. Результаты исследования могут служить основой для разработки эффективных каталитических систем для очистки отходящих газов нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности от диоксида серы. Таким образом, установлено, что в мягких условиях ($T = 30 - 60^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{O}_2} = 0 - 1$ атм) сульфит натрия эффективно окисляется кислородом в водных растворах хлоридов меди(II) и железа(III) до сульфата натрия с высокими выходами (90 – 100 %).

The paper focuses at researching the model reaction of sodium sulfite oxidation in soft conditions ($T = 30 - 60^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{O}_2} = 1$ atm) in water solutions in the presence of copper (II) and iron (III) chlorides modified by humic acids to give sodium sulfate oxygen. The purpose of the research is developing new effective homogeneous catalysts of sodium sulfite liquid-phase oxidation in water solutions for purification of flue gases from sulfur dioxide. Using the methods of kinetics, volumetric, redox-potentiometry, IR-spectroscopy, gravimetry the kinetics, mechanism, intermediate and final products, optimum conditions, kinetic and activation parameters of the reaction of Na_2SO_3 liquid-phase oxidation in water solutions have been defined. Influence of the concentration of reagents (chloric copper, chloric iron, humic acid, yellow phosphorus) and temperature on the speed of reactions was studied. Catalytic effect of copper and iron chlorides on the speed of sodium sulfite oxidation with oxygen in water solutions to get sodium sulfate was found. Optimum conditions for reaction and good exit of sulfate of sodium are reached at 60°C at the molar ratio of reagents $[\text{FeCl}_3]:[\text{Na}_2\text{SO}_3] = (0,1:1,0)$ and $[\text{CuCl}_2]:[\text{Na}_2\text{SO}_3]:[\text{HHum}] = (0,129:1,0:0,005)$. Kinetic and activation parameters were calculated. The studied processes proceeds were found to follow the oxidation-reduction mechanism and to consist of two key stages: Cu(II) and Fe(III) reduction with sodium sulfite to Cu(0) and Fe(I) with formation of sodium sulfate and Cu(I) oxidation to Cu(II) with Fe(II) oxidation to Fe(III) with oxygen. The results of the research can form a basis for developing effective catalytic systems for purification of flue gases from sulfur dioxide in the oil-processing and petrochemical industry. Thus, sodium sulfite was found to be effectively oxidized with oxygen in soft conditions ($T = 30 - 60^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{O}_2} = 0-1$ atm) in water solutions of copper(II) and iron(III) chlorides to sodium sulfate with high yields (90 – 100 %).

Ключевые слова: сульфит натрия, хлориды меди и железа, гумусовая кислота.

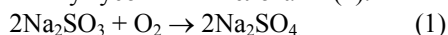
Keywords: sodium sulfite, copper and iron chlorides, humic acid.

Диоксид серы входит в состав многих промышленных отходов. Реакция окисления SO_2 в SO_3 используется для получения H_2SO_4 и очистки отходящих газов от SO_2 [1]. Без катализаторов реакция окисления SO_2 в SO_3 кислородом не протекает, так как заторможена по спину и симметрии. В нефтеперераба-

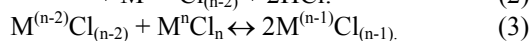
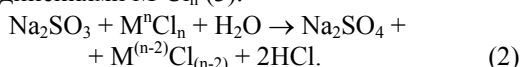
тывающей и нефтехимической промышленности диоксид серы является характерным кислым веществом, который наряду с диоксидом углерода, сероводорода и оксидов азота, выбрасывается в атмосферу. Несмотря на то, что на сегодняшний момент известен ряд гетерогенно-каталитических методов окисления SO_2 и

SO₃ [2; 3], данная реакция в присутствии гомогенных каталитических систем остаётся всё ещё практически малоизученной. Для этой цели нами впервые в качестве иммобилизаторов использованы гумусовые кислоты, выделенные экстракцией из бурого угля казахстанского месторождения Ой-Карагай.

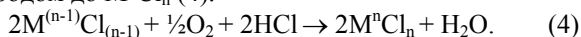
В данной работе приводятся результаты по исследованию модельной реакции окисления сульфита натрия до сульфата кислородом при 30 – 60°С и P_{O₂} = 1 атм в водных средах в присутствии гомогенных катализаторов на основе хлоридов меди(II) и железа(III), модифицированных гумусовыми кислотами (1).



Процессы окисления Na₂SO₃ кислородом в водных растворах хлоридов меди и железа MⁿCl_n (M = Cu, n = 2; M = Fe, n = 3) протекают через ключевые реакции восстановления MⁿCl_n (Cu(II), Fe(III)) сульфитом натрия до сульфата (2) и окисления M⁽ⁿ⁻²⁾Cl_(n-2) (Cu, FeCl) соединениями MⁿCl_n (3).



Образующиеся M⁽ⁿ⁻¹⁾Cl_(n-1) быстро окисляются кислородом до MⁿCl_n (4).



В результате протекания стадий (3, 4) компоненты CuCl₂ и FeCl₃ возвращаются в каталитический цикл. Из этих стадий следует, что сульфит натрия непосредственно с кислородом не взаимодействует. Роль окислителя сульфита натрия в стадии (2) выполняют комплексы Cu(II) и Fe(III), являющиеся эффективными акцепторами электронов.

Материалы и методы

Кинетику реакции изучали волнометрическим методом по поглощению кислорода на термостатированной установке с интенсивно встряхиваемым реактором непроточным стеклянным безградиентным реактором типа «каталитическая утка», снабженным потенциометрическим устройством и соединенным с газометрической бюреткой. Потенциал каталитического раствора измеряли при помощи устройства, состоящего из платинового и каломельного электродов со шлифом в качестве электролитического ключа. Хлориды CuCl₂·2H₂O, FeX₃·6H₂O и Na₂SO₃ использовали марки «х. ч.» и вводили в реакцию без предварительной осушки. Гумусовые кислоты выделяли из угля Ой-Карагайского месторождения экстракцией 0,1 % водным раствором NaOH. Концентрацию гумусовых кислот в Na-форме определяли потенциометрическим титрованием 0,1 М водным раствором HCl по известной методике [4]. Выделенную смесь гумусовых кислот анализировали на спектрометре Фурье ИК-спектрометр Spectrum 65 в диапазоне 4000 – 450 см⁻¹. Жидкие образцы (водные) снимали в кювете из CaF₂, а твердые в таблетках с KBr и идентифицировали по полосам поглощения групп О-Н (фенолы) (2500 – 3200 см⁻¹) и С=О (карбоновые кислоты) (1700 см⁻¹).

Эксперименты проводили по следующей методике. В реактор объемом 150 мл заливали 10 мл дистиллированной воды, засыпали навеску катализатора (CuCl₂·2H₂O, FeX₃·6H₂O) и продували 100% кислоро-

дом. Нагревали реактор и бюретку до температуры опыта, пока катализатор не растворится полностью и измеряли начальный редокс-потенциал раствора. Затем в токе кислорода вносили водный раствор гумусовых кислот и сульфит натрия и включали электродвигатель. В течение опыта непрерывно измеряли объем поглощенного кислорода и значение потенциала в реакционном растворе, определяемое соотношением пары Cu(II)/Cu(I), Fe(III)/Fe(II) (φ, В), и замеряемое погруженным в раствор платиновым электродом относительно каломельного полуэлемента с помощью потенциометра рН-340, и затем пересчитывали по водородной шкале. Температуру поддерживали с точностью ±0,5°С с помощью термостата U-8. Когда скорость поглощения кислорода из бюретки падала ниже 0,1 мл/мин, реакцию считали законченной, раствор из реактора сливали и проводили гравиметрический анализ на количественное содержание сульфата натрия.

В ходе опыта измеряли скорость поглощения O₂ реакционным раствором W_{O₂} (моль·л⁻¹·мин⁻¹), количество поглощенного кислорода Q (моль·л⁻¹) и редокс-потенциал каталитического раствора φ (В) в момент времени τ (мин). По экспериментальным данным зависимости φ, W_{O₂} от времени τ строили потенциометрические (φ-τ) и кинетические (W_{O₂}-τ) кривые, а конверсионные (W_{O₂}-Q) кривые также по данным зависимости скорости поглощения кислорода от количества прореагировавшего кислорода. Количественный анализ сульфита натрия определяли гравиметрическим методом [4].

Результаты и обсуждение

Установлено, что сульфит натрия быстро окисляется O₂ при 30 – 60°С в водных растворах в присутствии хлоридов меди(II) CuCl₂ и железа(III) FeCl₃ с образованием сульфата натрия (90 – 100 %) (1). Скорость реакции окисления Na₂SO₃ кислородом и выход сульфата натрия растут с увеличением температуры и концентрации Cu(II), Fe(III). На окисление одного моля Na₂SO₃ расходуется 0,5 молей кислорода, что соответствует стехиометрии реакций (1). Условия реакции и выходы продуктов окисления сульфита натрия кислородом в водных растворах CuCl₂ и FeCl₃ представлены в таблицах 1 и 2.

Окисление Na_2SO_3 кислородом в водных растворах CuCl_2

Состав раствора, моль/л				$T, ^\circ\text{C}$	$W_{\text{макс}} \cdot 10^2,$ моль/(л·мин)
$[\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$	$[\text{Na}_2\text{SO}_3]$	$[\text{H}_2\text{O}]$	$[\text{NaГум}]$		
<i>Варьирование температуры</i>					
0,053	0,41	56	-	30	0,50
0,053	0,41	56	-	40	0,56
0,053	0,41	56	-	50	0,70
0,053	0,41	56	-	60	0,93
<i>Варьирование концентрации катализатора</i>					
0,053	0,41	56	-	60	0,55
0,110	0,41	56	-	60	0,93
0,210	0,41	56	-	60	1,04
0,410	0,41	56	-	60	2,44
<i>Варьирование концентрации фульво-кислоты, выделенной из угля Ой-Карагайского месторождения</i>					
0,053	0,41	52	0,0010	60	1,16
0,053	0,41	51	0,0015	60	1,62
0,053	0,41	50	0,0020	60	1,74
0,053	0,41	44	0,0040	60	1,74
0,053	0,41	38	0,0060	60	1,74

Таблица 2

Окисление Na_2SO_3 кислородом в водных растворах FeCl_3

Состав раствора, моль/л				$T, ^\circ\text{C}$	$W_{\text{макс}} \cdot 10^2,$ моль/(л·мин)
$[\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$	$[\text{Na}_2\text{SO}_3]$	$[\text{H}_2\text{O}]$	$[\text{NaГум}]$		
<i>Варьирование температуры</i>					
0,04	0,41	56	-	30	3,56
0,04	0,41	56	-	40	5,04
0,04	0,41	56	-	50	5,68
0,04	0,41	56	-	60	6,38
<i>Варьирование концентрации катализатора</i>					
0,04	0,41	56	-	60	6,38
0,05	0,41	56	-	60	6,03
0,20	0,41	56	-	60	3,25
0,40	0,41	56	-	60	0,29

В отсутствие катализаторов CuCl_2 и FeCl_3 реакция окисления сульфита натрия кислородом протекает очень медленно и поглощение кислорода водным раствором сульфита натрия не наблюдается. Повышение концентрации CuCl_2 с 0,053 до 0,41 моль/л приводит к повышению скорости поглощения кислорода почти в 2,5 раза (рисунок 1а). Количество поглощенного кислорода не зависит от $[\text{CuCl}_2]$ и соответствует стехиометрии. Порядок реакции, найденный из зависимости $\lg W_{\text{макс}}$ от $\lg [\text{CuCl}_2]$, близок к первому. Внесение навески Na_2SO_3 в зеленый водный раствор CuCl_2 в атмосфере O_2 сопровождается смещением редокс-потенциала пары Cu(II)/Cu(0) (φ_{Cu}) в катодную сторо-

ну от 0,4 до 0,2 В в течение 2 – 5 минут, изменением исходного зелёного цвета раствора, образованием сначала коричневого осадка и началом поглощения O_2 (рисунок 1б). По мере поглощения кислорода потенциал φ_{Cu} постепенно сдвигается в анодную область, цвет раствора возвращается к исходному зеленому. В случае повышения концентрации FeCl_3 с 0,04 до 0,4 моль/л величина $W_{\text{макс}}$ уменьшается с 6,38 до 0,29 моль/(л·мин) (таблица 2). Следует отметить, что $W_{\text{макс}}$ поглощения O_2 в присутствии FeCl_3 в 3 раза выше, чем в присутствии хлорной меди.

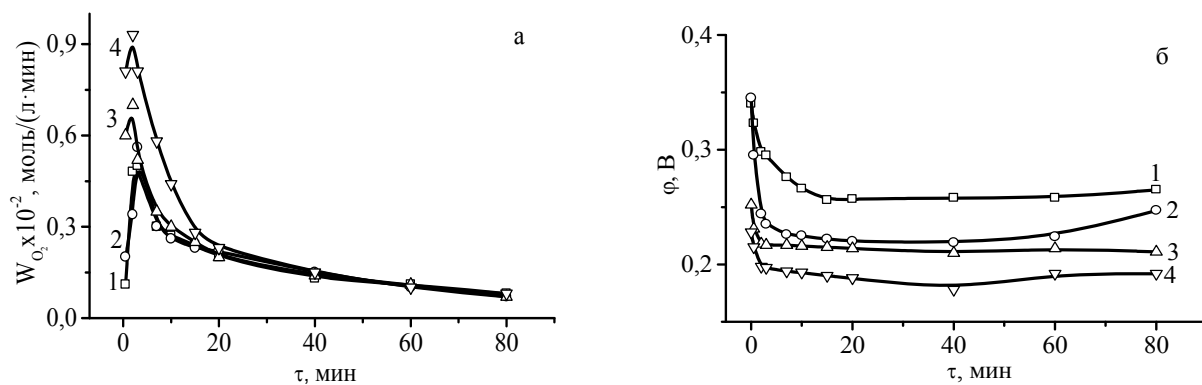


Рис. 1. Кинетические (а) и потенциметрические (б) кривые окисления Na_2SO_3 кислородом в водной среде в присутствии хлорида меди (II). Условия реакции, моль/л: $[\text{CuCl}_2]$ 0,053; $[\text{Na}_2\text{SO}_3]$ 0,41; $[\text{H}_2\text{O}]$ 56; P_{O_2} 1 атм; $T, ^\circ\text{C}$: 1 – 30; 2 – 40; 3 – 50; 4 – 60

Конверсионные и кинетические кривые имеют экстремальный характер для систем с CuCl_2 , а для систем с FeCl_3 они имеют ниспадающий вид. Скорость реакции, незначительная в начале опыта, быстро увеличивается и достигает точки максимума, затем постепенно падает до нуля. Экстремальный характер кинетических и конверсионных кривых симбатен смещению ϕ_{Cu} на потенциметрических кривых. Потенциметрические кривые каталитического окисле-

ния Na_2SO_3 кислородом проходят через минимум, симбатный начальному участку кинетической кривой поглощения. Установлены первые порядки по концентрации реагентов и катализатора. Увеличение температуры в интервале 30 – 60° С положительно сказывается на скорости реакции (1) и выходе целевого продукта (таблицы 1, 2). Максимальная скорость поглощения кислорода наблюдается при 60° С.

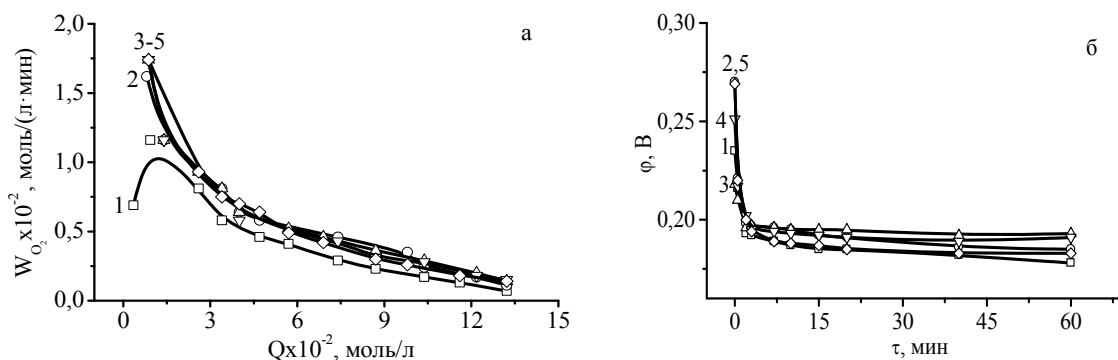


Рис. 2. Конверсионные (а) и потенциметрические (б) кривые окисления Na_2SO_3 кислородом в водной среде в присутствии хлорида меди (II) и гумусовой кислоты, выделенной из угля Ой-Карагайского месторождения. Условия реакции, моль/л: $[\text{CuCl}_2]$ 0,053; $[\text{Na}_2\text{SO}_3]$ 0,41; $[\text{H}_2\text{O}]$ 38-52; 60° С; P_{O_2} 1 атм; $[\text{NaГум}]$: 1 – 0,001; 2 – 0,0015; 3 – 0,002; 4 – 0,004; 5 – 0,006

Скорость каталитической реакции (1) в присутствии CuCl_2 определяется соотношением скоростей стадий (2 – 4) и характеризуется наличием максимума на кинетических и конверсионных кривых. Как видно из потенциметрических кривых процесса, редокс-потенциал раствора смещается в катодную сторону мгновенно, что свидетельствует о высокой скорости восстановления Cu(II) до Cu(0) . Скорость суммарного каталитического процесса (1) определяется скоростью самой медленной реакции и характеризуется наличием максимума на кривых поглощения кислорода. На восходящих участках превалирует реакция восста-

новления иона металла ($W_{\text{в}}$), что вызывает катодное смещение редокс-потенциала, на ниспадающих – окисление ($W_{\text{ок}}$) восстановленной формы металла, сопровождающееся анодным смещением потенциала системы. В точке максимума скорости реакций равны: $W_{\text{max}} = W_{\text{в}} = W_{\text{ок}}$.

Концентрации гумусовых кислот, выделенных из бурого угля Ой-Карагайского месторождения, варьировали в интервале от 0,001 до 0,006 моль/л. При увеличении концентрации гумусовой кислоты в систему $\text{CuCl}_2\text{-Na}_2\text{SO}_3\text{-H}_2\text{O}$ скорость поглощения кислорода растёт и при увеличении концентрации гумусовой ки-

слоты до 0,002 моль/л она перестаёт меняться (таблица 1, рис. 2). Конверсионные и кинетические кривые после добавки NaГум имеют ниспадающий вид и скорость поглощения кислорода $W_{\text{макс}}$ повышается в 3 раза. Это свидетельствует о том, что добавка гумусовой кислоты ускоряет стадию восстановления ионов меди(II) сульфитом натрия. Добавка гумусовых кислот в систему $\text{FeCl}_3\text{-Na}_2\text{SO}_3\text{-H}_2\text{O}$ приводит к резкому снижению скорости поглощения кислорода каталитическим раствором почти в 4 – 6 раз. Данное обстоятельство можно объяснить с закомплексованностью ионов Fe(III), ответственных за катализ, гумусовыми кислотами за счёт функциональных групп -ОН и -СООН.

Увеличение температуры в интервале 40 – 60° С положительно сказывается на скорости реакции (1) в случае хлорной меди и максимальная скорость реакции наблюдается при 60°С (таблица 1), а в случае хлорного железа величина $W_{\text{макс}}$ проходит через максимум. Анализ экспериментальных данных показал, что за окисление сульфита натрия ответственны CuCl_2 и FeCl_3 .

Кинетические закономерности окисления сульфита натрия кислородом в водных растворах катализаторов M^nCl_n хорошо описываются уравнением (5), полученным методом стационарных концентраций [5]:

$$W_{\text{O}_2} = \frac{k_6 k_{\text{ок}} [\text{Na}_2\text{SO}_3][\text{H}_2\text{O}][\text{M}^n\text{Cl}_n]_{\Sigma} [\text{O}_2]}{k_{\text{ок}} [\text{O}_2] + k_6 [\text{Na}_2\text{SO}_3][\text{H}_2\text{O}]}, \quad (5)$$

где k_6 и $k_{\text{ок}}$ – константы ключевых реакций (2 – 4); $[\text{Na}_2\text{SO}_3]$, $[\text{H}_2\text{O}]$, $[\text{M}^n\text{Cl}_n]$, $[\text{O}_2]$ – концентрации соответствующих реагентов, моль/л.

Кинетические закономерности окисления сульфита натрия в присутствии в присутствии комплексов CuCl_2 и FeCl_3 и изменении концентрации компонентов каталитического раствора в интервале:

$[\text{Na}_2\text{SO}_3] = 0,41$; $[\text{CuCl}_2] = 0,053 - 0,41$;

$[\text{FeCl}_3] = 0,01 - 0,05$; $[\text{H}_2\text{O}] = 38 - 56$;

$[\text{NaГум}] = 0,001 - 0,006$;

$[\text{O}_2] = 4,46 \cdot 10^{-2}$ моль/л достаточно хорошо описываются уравнением (5).

Графическим решением уравнения (5) были вычислены значения k_6 и $k_{\text{ок}}$. Из данных по влиянию температуры на скорость поглощения кислорода в координатах Аррениуса $\lg k - 1/T$ рассчитаны значения энергии (E^\ddagger) и энтропии активации (ΔS^\ddagger). Вычисленные кинетические и активационные параметры ключевых стадий каталитического окисления Na_2SO_3 кислородом в водных растворах CuCl_2 и FeCl_3 в отсутствие и присутствии гумусовых кислот при 60° С приведены в таблице 3.

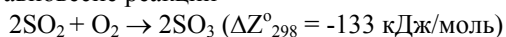
Таблица 3

Кинетические и активационные параметры жидкофазного окисления сульфита натрия в водных растворах CuCl_2 и FeCl_3 при 60°С

Параметр	Каталитический раствор			
	$\text{H}_2\text{O-CuCl}_2$	$\text{H}_2\text{O-НГум-CuCl}_2$	$\text{H}_2\text{O-FeCl}_3$	$\text{H}_2\text{O-НГум-FeCl}_3$
$k_6, \text{л}^2/(\text{моль}^2 \cdot \text{мин})$	$1,5 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^2$	$5,1 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^2$
$k_{\text{ок}}, \text{л}/(\text{моль} \cdot \text{мин})$	$1,1 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^5$	$0,6 \cdot 10^5$
$E^\ddagger, \text{кДж/моль}$	8,6	5,9	13,6	25,9
$\Delta S^\ddagger, \text{Дж/моль} \cdot \text{К}$	-166,4	-161,2	-148,0	-161,8

Из таблицы 1 видно, что k_6 в случае катализаторов CuCl_2 и FeCl_3 близки между собой и больше $k_{\text{ок}}$ на 2 порядка. Это свидетельствует о том, что реакция восстановления M^nCl_n сульфитом натрия до сульфата (2) протекает намного быстрее, чем реакция окисления $\text{M}^{(n-2)}\text{Cl}_{(n-2)}$ (Cu , FeCl) соединениями M^nCl_n (3), что подтверждается кинетическими исследованиями. Рассчитанные значения энергии активации E^\ddagger для CuCl_2 уменьшаются в 1,5 раза при добавлении в раствор гумусовой кислоты, а для FeCl_3 она увеличивается в 2 раза. Отрицательные значения энтропии активации стадии восстановления ΔS^\ddagger свидетельствуют о координационном механизме окисления сульфита натрия кислородом в водных растворах CuCl_2 и FeCl_3 .

Реакция окисления SO_2 в SO_3 используется для получения H_2SO_4 и очистки отходящих газов от SO_2 [1]. Равновесие реакции



при нормальных температурах сдвинуто вправо. При 700° С преобладает обратный процесс, поэтому кинетические уравнения высокотемпературных процессов

всегда учитывают вклады прямой и обратной реакций.

Если реакция окисления SO_2 в SO_3 дикислородом не протекает без катализаторов, так как запрещена по спину и по симметрии, то при координации O_2 с d-металлами снимается запрет по спину и симметрии. Координированная O_2 легко реагирует с SO_2 . Особые свойства SO_2 обусловлены тем, что у нее две ВЗМО, сосредоточенные на S- и O-атомах. ВЗМО, локализованная на O-атоме, предпочитает зарядное, а на S-атоме – орбитальное сочетание. НСМО находится у S-атома и предпочитает умеренно орбитальное связывание. При окислении SO_2 в SO_3 валентность S-атома возрастает от 4 до 6. Поэтому в переходном комплексе стадии окисления S-атом сам реагирует с двумя другими атомами, а O-атом не принимает участия в процессе. От природы и заряда атома металла зависит электрофильность S-атома SO_2 , требующаяся для эффективного взаимодействия с нуклеофильным O-атомом. При координации SO_2 с орбитальными металлами за счет повышенного вклада π -дативной компоненты увеличивается нуклеофильность S-атома, пре-

пятствующая атаке О-атома. При адсорбции SO₂ на оксидах благодаря усиленному σ-донорно-акцепторному переносу электронов возрастают нужные для реакции с О-атомом акцепторные параметры S-атома.

Таким образом, изучены влияние температуры и концентрации компонентов каталитического раствора на скорость образования и выход сульфата натрия,

кинетика и ключевые стадии, найдены оптимальные условия протекания жидкофазного окисления сульфита натрия. Установлено положительное влияние гумусовых кислот для систем с хлорной медью, температуры и катализатора на скорость каталитического окисления сульфита натрия. Выход сульфата натрия составил 90 – 100 %.

Литература

1. Дорфман, Я. А. Катализаторы и механизмы гидрирования и окисления / Я. А. Дорфман. – Алматы: Наука, 1984. – 352 с.
2. Страус, В. Промышленная очистка газов / В. Страус. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
3. Белов, П. С. Экология производства химических продуктов из углеводородов нефти и газа / П. С. Белов, И. А. Голубева, С. А. Низова. – М.: Химия, 1984. – 256 с.
4. Злобина, Е. В. Задания и методические указания для лабораторных занятий по аналитической химии: уч.-метод. пособие / Е. В. Злобина, Н. Д. Долгова. – Алматы: Қазақ университеті, 2010. – 114 с.
5. Moelwyn-Hughes, E. A. The chemical statics and kinetics on solutions / E. A. Moelwyn-Hughes. – NY: Academic Press, 1971. – 470 p.

Информация об авторах:

Кадырова Аякоз Бактыгаликызы – бакалавр факультета химии и химической технологии, кафедра физической химии, катализа и нефтехимии Казахского национального университета им. аль-Фараби, 8-775-706-85-86, ayok.92@mail.ru.

Ayakoz B. Kadyrova – Bachelor's Degree student at the Department Physical Chemistry, Catalysis and Petroleum Chemistry, Al-Farabi Kazakh National University.

Маркабаева Айдана Галимжановна – бакалавр факультета химии и химической технологии, кафедра физической химии, катализа и нефтехимии Казахского национального университета им. аль-Фараби, 8-775-615-97-01, 8-777-872-72-50, aidoka_markabaeva@mail.ru.

Aidana G. Markabaeva – Bachelor's Degree student at the Department Physical Chemistry, Catalysis and Petroleum Chemistry, Al-Farabi Kazakh National University.

Ешова Жания Турлухановна – кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии, катализа и нефтехимии Казахского национального университета им. аль-Фараби, 8-701-654-24-76, zh_yeshova@mail.ru.

Zhaniya T. Eshova – Candidate of Chemistry, Assistant Professor at the Department Physical Chemistry, Catalysis and Petroleum Chemistry, Al-Farabi Kazakh National University.

Каирбеков Жаксынтай Каирбекович – доктор химических наук, профессор кафедры физической химии, катализа и нефтехимии Казахского национального университета им. аль-Фараби, 8-701-158-44-00, Zhaxyntay.Kairbekov@kaznu.kz.

Zhaksyntay K. Kairbekov – Doctor of Chemistry, Professor at the Department Physical Chemistry, Catalysis and Petroleum Chemistry, Al-Farabi Kazakh National University.

Акбаева Дина Наурызбаевна – доктор химических наук, профессор кафедры физической химии, катализа и нефтехимии Казахского национального университета им. аль-Фараби, 8-700-458-59-65, 8-778-601-18-01, dnakbayeva@inbox.ru.

Dina N. Akbaeva – Doctor of Chemistry, Professor at the Department Physical Chemistry, Catalysis and Petroleum Chemistry, Al-Farabi Kazakh National University.