

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ПРИ ВЕЛЬЦЕВАНИИ ОКИСЛЕННОГО ЦИНКСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА

© 2019 г. **В.А. Шумский, Н.А. Куленова, Ж.С. Оналбаева,
З.М. Ахметвалиева, С.В. Мамяченков**

Восточный научно-исследовательский горно-металлургический институт цветных металлов
(ВНИИЦветмет), г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Восточно-Казахстанский государственный технический университет (ВКГТУ) им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Уральский федеральный университет (УрФУ) имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 11.08.18 г., доработана 24.09.18 г., подписана в печать 20.10.18 г.

Приведены результаты модельных исследований возможности сокращения энергозатрат и выбросов углекислого газа при вельцевании окисленного цинксоодержащего материала. При этом использовался специализированный программный продукт METSIM, широко известный в мировой практике моделирования металлургических процессов и производств, позволяющий анализировать влияние изменения технологических режимов на конечные результаты процесса. Модельные расчеты показали, что наибольшее снижение удельных расходов энергоносителей и выхода CO_2 наблюдается при использовании подогретого до 200°C воздушного дутья с увеличением его расхода от 1000 до 7000 н.м³/ч и сопутствующим снижением подсоса атмосферного воздуха. Расчетное сокращение удельных затрат углерода и выбросов CO_2 составило 30,2–35,5 %, а общих удельных затрат энергоносителей – 28–32 %. При этом подогрев дутья до 200°C в воздухоподогревателе котла-утилизатора не требует дополнительных энергозатрат, в отличие от варианта использования кислородного дутья с расходом электроэнергии на производство кислорода. Интенсификация процесса вельцевания с применением дополнительного кислородного дутья (или обогащения воздушного дутья кислородом) и подачей нагретого воздушного дутья с сопутствующим снижением подсосов атмосферного воздуха приводит не только к снижению удельного расхода углеродного энергоносителя, но и к повышению степени использования углерода. Максимальное расчетное повышение степени использования углерода составило 6,2 отн.% – от 60,3 % (на холодном воздушном дутье без использования кислорода) до 66,5 % (на нагретом до 200°C воздушно-кислородном дутье (7000 н.м³/ч воздуха и 185 н.м³/ч кислорода) без подсосов атмосферного воздуха). Поддержание оптимального окислительно-восстановительного и теплового режимов процесса требует корректного регулирования тягодутьевого режима печи с учетом подсосов атмосферного воздуха в разгрузочной головке печи. Несогласованные изменения удельных расходов шихты, углерода, дутья и разрежения в пылевой камере ведут к сопутствующему снижению извлечения цинка в возгоны и увеличению его потерь с клинкером.

Ключевые слова: энергозатраты, углеродные энергоносители, углекислый газ, вельцевание, окисленный цинксоодержащий материал, модельные исследования.

Шумский В.А. – канд. техн. наук, зам. директора по научной работе ВНИИЦветмет (070002, Респ. Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Промышленная, 1). E-mail: vs2009@inbox.ru.

Куленова Н.А. – канд. техн. наук, доцент, зав. науч.-произв. комплексом «Металлургия» ВКГТУ (070010, Респ. Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19). E-mail: 3007kulenova53@gmail.com.

Оналбаева Ж.С. – докт. PhD, зав. кафедрой «Инновационные технологии в горно-металлургической отрасли» ВКГТУ. E-mail: zhanara-05@mail.ru.

Ахметвалиева З.М. – докт. PhD, ВКГТУ. E-mail: zakhmetyali@gmail.com.

Мамяченков С.В. – докт. техн. наук, профессор кафедры металлургии тяжелых цветных металлов УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17, оф. С-108). E-mail: svmamachenkov@yandex.ru.

Для цитирования: Шумский В.А., Куленова Н.А., Оналбаева Ж.С., Ахметвалиева З.М., Мамяченков С.В. Исследование возможности сокращения выбросов углекислого газа при вельцевании окисленного цинксоодержащего материала. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. No. 2. С. 65–74. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-2-65-74.

Shumskiy V.A., Kulenova N.A., Onalbayeva Zh.S., Akhmetvaliyeva Z.M., Mamyachenkov S.V.

Investigation of the possibility of carbon dioxide reduction by Waelz processing of oxidized zinc-containing material

The results of model studies on the possibility of reducing energy costs and carbon dioxide emissions during the Waelz processing of oxidized zinc-containing material in waelz kilns are presented. The studies were carried out using a specialized software product METSIM widely known in the world practice of metallurgical process and production modeling that allows analyzing the effect of changes in technological modes on the final results of the process. Model calculations showed that the greatest decrease in specific energy consumption and CO₂ emissions is observed when using blast air heated to 200 °C with an increase in its flow rate from 1000 to 7000 n.m³/h and concomitant decrease in atmospheric air suction. The estimated reduction in the specific costs of carbon and CO₂ emissions amounted to 30,2–35,5 %, and the total specific cost of energy carriers – 28–32 %. At the same time, blast air heating to 200 °C in the heat exchanger of the recovery boiler does not require additional energy inputs, in contrast to the use of oxygen blast with the cost of electricity for producing oxygen. Intensification of the waelz process using additional oxygen blasting (or air blast enrichment with oxygen) and heated blast air supply with concomitant decrease in air suction into the furnace from the atmosphere leads not only to a decrease in the specific consumption of the carbon energy carrier, but also to an increase in the degree of carbon utilization. The maximum estimated increase in the degree of carbon utilization was 6,2 rel.% – from 60,3 % on cold air blast without oxygen to 66,5 % on an air-oxygen blast (7000 n.m³/h of air and 185 n.m³/h of oxygen) heated up to 200 °C without atmospheric air. Maintaining optimal oxidation-reduction and thermal modes of the process requires correct regulation of the kiln draft mode taking into account atmospheric air suction in the unloading head of the kiln. Uncoordinated changes in the specific consumptions of charge, carbon, blast air and rarefaction in the dust chamber lead to a concomitant decrease in the extraction of zinc to sublimates and increase in its losses with clinker.

Keywords: energy inputs, carbon energy carriers, carbon dioxide, Waelz process, oxidized zinc-containing material, model studies.

Shumskiy V.A. – Cand. Sci. (Tech.), Deputy director of Scientific Work of the Eastern Research Mining and Metallurgical Institute of Nonferrous Metals (VNIItsvetmet) (070002, Republic of Kazakhstan, Ust'-Kamenogorsk, Promyshlennaya str., 1). E-mail: vs2009@inbox.ru.

Kulenova N.A. – Cand. Sci. (Tech.), Associate prof., Head of Research and production complex «Metallurgy», East Kazakhstan State Technical University (EKSTU) (070010, Republic of Kazakhstan, Ust'-Kamenogorsk, Serikbayev str., 19). E-mail: 3007kulenova53@gmail.com.

Onalbayeva Zh.S. – PhD, Head of Sub-department «New Technologies of Mining and Metallurgy Industry», EKSTU. E-mail: zhanara-05@mail.ru.

Akhmetvaliyeva Z.M. – Doctoral student, EKSTU. E-mail: zakhmetyali@gmail.com.

Mamyachenkov S.V. – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Department of metallurgy of heavy non-ferrous metals, Ural Federal University (620002, Russia, Ekaterinburg, Mira str., 17, off. C-108). E-mail: svmamyachenkov@yandex.ru.

Citation: *Shumskiy V.A., Kulenova N.A., Onalbayeva Zh.S., Akhmetvaliyeva Z.M., Mamyachenkov S.V.* Investigation of the possibility of carbon dioxide reduction by Waelz processing of oxidized zinc-containing material. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 2. P. 65–74 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-2-65-74.

Введение

В настоящее время проблемы экологии приобрели особую значимость, среди которых особое место занимает вопрос эмиссии парниковых газов (диоксида углерода, метана, закиси азота, гексафторида серы, перфторуглерода, гидрофторуглерода, паров воды), которые влияют на климат Земли, вызывая его потепление. Подписанный в 1997 г. международный документ, известный как Киотский протокол, обязывал развитые страны и страны с переходной экономикой сократить объем выбросов парниковых газов в атмосферу [1–4].

Одним из основных загрязнителей атмосферы является CO₂, образующийся в результате использования органического топлива в энергетической, горно-металлургической и химической отраслях [4–13].

К сожалению, в 2008 г. выбросы CO₂ по сравнению с 1990 г. увеличились на 40 %, а к концу XXI в.

более чем на 60 % превысят доиндустриальный уровень [13].

Сокращения выбросов можно достичь в результате реализации мероприятий по повышению энергетической эффективности, экономии топлива и сырья, внедрению новых технологий, использованию возобновляемых источников энергии, замещению ископаемых видов топлива на возобновляемые ресурсы и т.д.

Известно, что эффективным фактором снижения выбросов CO₂ в металлургии может быть применение кислорода в процессах горения. Горение топлива в атмосфере, обогащенной кислородом, по сравнению с горением в среде атмосферного воздуха ведет к удвоению термодинамического КПД, снижению более чем на 40 % расхода топлива и вносит значительный вклад в сокращение выбросов диоксида углерода [13]. В цветной метал-

лургии это достигается за счет уменьшения расхода углеродсодержащих энергоносителей.

Достаточно распространенным металлургическим процессом, использующим углеродное топливо и восстановитель, является вельцевание окисленного цинксодержащего сырья [14–18]. Его смешивают с углеродным материалом, служащим и топливом, и восстановителем, и при температуре, исключающей плавление материала, перемешивают шихту для равномерной газификации углерода и отгонки цинка по всей массе шихты. Несмотря на эффективность процесса вельцевания и достаточно широкое его применение для переработки окисленных цинксодержащих материалов, ему присущ такой существенный недостаток, как большой расход дорогостоящего углеродного энергоносителя (как правило, коксовой мелочи), что влечет за собой повышенные выбросы CO_2 в атмосферу.

В литературе известен ряд технических решений, позволяющих снизить расход коксовой мелочи и повысить производительность печного агрегата при вельцевании окисленных цинксодержащих материалов [19–22].

Целью данной работы являлся модельный анализ возможности и путей сокращения удельных затрат углеродного энергоносителя и сопутствующих выбросов парникового газа CO_2 при вельцевании окисленного цинксодержащего материала.

Экспериментальная часть

Модельные исследования вельцевания окисленного цинксодержащего материала (сырья) проводили в среде специализированного программного продукта METSIM, известного в мировой практике моделирования металлургических процессов и производств и позволяющего анализировать влияние изменения технологических режимов на конечные результаты процесса [23–25].

Величина загрузки и состав окисленного цинксодержащего сырья (табл. 1) для модельных исследований процесса вельцевания соответствовали реальным промышленным данным. Состав модельного углеродного материала (УМ) отвечал коксовой мелочи (табл. 2), а для отладки модели использованы сведения по выходу и составу клинкера (табл. 3) и вельц-оксидов (табл. 4), отвечаю-

Таблица 1

Загрузка и состав модельного цинксодержащего сырья

Загрузка, т/год	Состав (без добавки топливно-восстановительных материалов), мас. %									
	Zn	Pb	Cu	Fe	SiO_2	CaO	$\text{S}_{\text{общ}}$	SO_4	$\text{C}_{\text{общ}}$	CO_3
94926	24,85	5,29	1,56	21,7	7,11	3,35	3,88	—	2,5	2,5

Таблица 2

Состав модельного углеродного материала

Углеродный материал	Массовая доля в сухой массе, %					Влага, %	Зола, %
	C	H	O	N	S		
Коксовая мелочь	81,0	0,85	0,7	0,7	0,35	20,0	16,4

Таблица 3

Величина выхода и состав клинкера, использованные для отладки модели

Выход, т/год	Состав, мас. %									
	Zn	Pb	Cu	Fe	SiO_2	CaO	$\text{S}_{\text{общ}}$	SO_4	$\text{C}_{\text{общ}}$	
56667	1,3	0,67	2,18	25,14	—	—	6,16	—	20,08	

Таблица 4

Величина выхода и состав вельц-оксидов, использованные для отладки модели

Вид возгонов	Выход, т/год	Состав, мас. %								
		Zn	Pb	Cu	Fe	SiO_2	CaO	S	SO_4	$\text{C}_{\text{общ}}$
Тонкие	27987	57,88	9,45	0,56	1,65	0,92	—	0,7	—	0,135
Грубые	19701	33,8	10,16	0,45	—	—	—	—	—	—

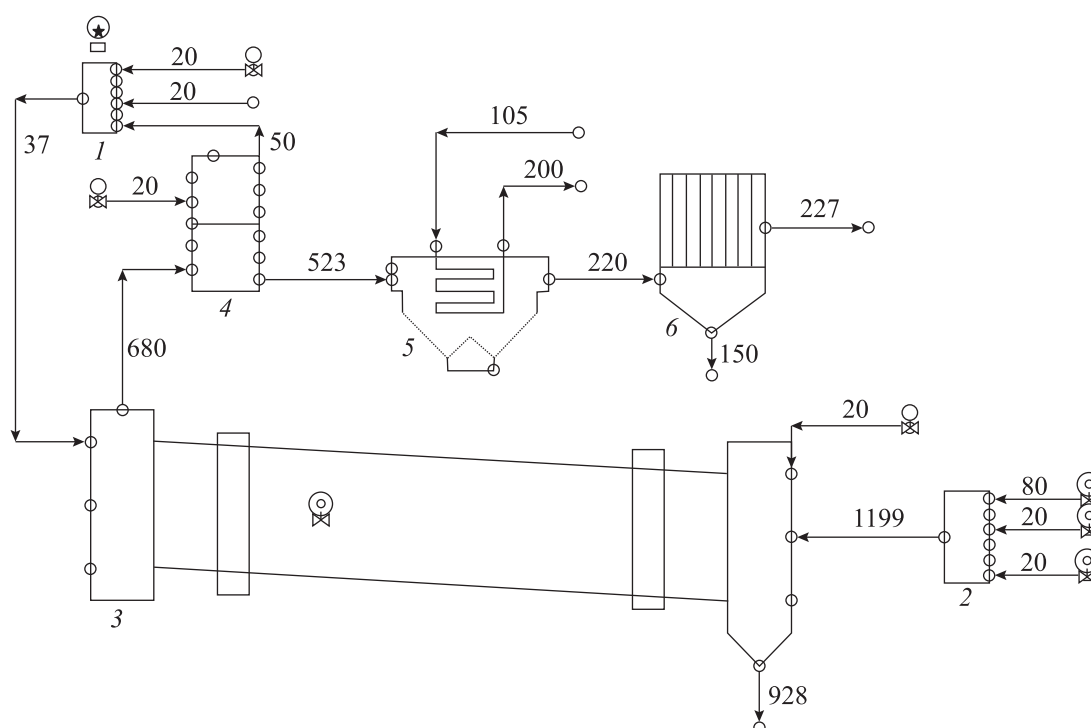


Рис. 1. Схема METSIM-модели вельцевания цинксо­дер­жа­ще­го сы­рья

Модельные модули: 1 — смеситель шихты, 2 — горелка, 3 — вельц-печь, 4 — пылевая камера, 5 — котел-утилизатор, 6 — рукавный фильтр. На стрелках указаны значения температуры (°C) материальных потоков

щие практике вельцевания цинксо­дер­жа­ще­го ма­те­ри­ала.

В модельную шихту помимо окисленного цинк­со­дер­жа­ще­го сы­рья входил УМ, служащий не толь­ко то­п­ливом и вос­ста­новителем, но и кол­лек­то­ром жидкой фазы, образуемой в реак­ци­он­ной зо­не вра­ща­ю­щейся трубчатой печи, в которой осу­ществ­ляется процесс вельцевания [14, 15].

Согласно данным [15] на поддерж­ку теп­ло­вого ре­жи­ма печи за счет реак­ции го­ре­ния рас­хо­ду­ется 30–40 % уг­ле­род­но­го ма­те­ри­ала, на уг­ле­тер­ми­че­ское вос­ста­нов­ле­ние — 20–30 % и на уп­лот­не­ние клинкера — 15–30 %. При этом об­щий рас­ход УМ может со­став­лять 350–700 кг/т цинк­со­дер­жа­ще­го сы­рья в за­ви­си­мо­сти от их со­ставов.

Для исклю­че­ния влия­ния на модель­ный анализ ка­че­ства УМ срав­ни­тель­ные оцен­ки вы­пол­няли в рас­че­те на чистый уг­ле­род. Па­ра­мет­ры низ­шей теп­лоты сго­ра­ния уг­ле­род­ных ма­те­ри­алов и ма­зута в ис­ход­ных дан­ных при оцен­ке энер­го­зат­рат на ус­лов­ное то­п­ливо при­ни­ма­ли по справочнику [26].

Чтобы со­по­став­ить удель­ные за­т­ра­ты энер­го­но­си­те­лей, ис­поль­зо­ва­ли еди­ные клю­че­вые па­ра­мет­ры модель­но­го про­цесса:

- максимальная температура в реак­ци­он­ной зо­не печи — 1250 °C;

- кон­цен­тра­ция кис­ло­ро­да в от­хо­дя­щих из пе­чи га­зах — 1,5 об. %.

Под­сос воз­ду­ха в модель­ную печь за­да­ва­ли по раз­ни­це между тре­бу­е­мым ко­личес­твом кис­ло­ро­да в про­цесс и его по­ступ­ле­нием с воз­душ­ным и кис­ло­род­ным ду­тьем. Ба­зо­вым ва­ри­ан­том в модель­ном анализе при­няты:

- рас­че­тный рас­ход кок­со­вой мелочи — 323,6 кг/т сы­рья (или 262,1 кг/т сы­рья в рас­че­те на уг­ле­род);
- воз­душ­ное ду­тье на горелку — 1000 м³/ч при нор­маль­ных ус­ло­виях (да­лее н.у.);
- рас­ход кис­ло­род­но­го ду­тья (96 % O₂) — 185 м³/ч при н.у.;
- тем­пе­ра­тура ду­тья — 20 °C;
- рас­ход ма­зута — 10 кг/т сы­рья.

Схема METSIM-модели вельцевания окис­лен­но­го цинк­со­дер­жа­ще­го сы­рья с ути­ли­за­цией теп­ла от­хо­дя­щих га­зов и улав­ли­ва­нием цин­ко­вых ок­си­дов пред­став­ле­на на рис. 1.

Результаты и их обсуждение

Результаты модельных рас­че­тов про­цесса вель­це­ва­ния окис­лен­но­го цинк­со­дер­жа­ще­го сы­рья при раз­лич­ных ре­жи­м­ных па­ра­мет­рах по­ка­за­ны

на рис. 2—5 и в табл. 5, где также приведены оценочные затраты энергоносителей и общие энергозатраты, измеряемые в количестве условного топлива (УТ, кг) на 1 т сырья.

Как следует из данных табл. 5 и рис. 2 и 3, подогрев воздушного дутья с 20 до 400 °С (при его расходе 1000 н.м³/ч при н.у. и вдувании дополнительно кислорода в объеме 185 н.м³/ч при н.у.) меньше влияет на расход энергоносителей и выход CO₂, чем повышение расхода кислородного дутья. В то же время увеличение расхода подогретого до 200 °С воздушного дутья сильнее влияет на анализируемые удельные показатели, чем повышение расхода кислородного дутья без подогрева (ср. рис. 2 и 4, 5).

При этом подогрев дутья до 200 °С в воздухоподогревателе котла-утилизатора не требует дополнительных энергозатрат в отличие от варианта использования кислородного дутья, где расходуется электроэнергия на производство кислорода.

Относительные изменения удельных затрат углерода и общих удельных энергозатрат от базового варианта приведены в табл. 6.

Из данных табл. 5 следует, что интенсификация процесса восстановительного углетермического обжига с использованием дополнительного кислородного дутья (или обогащения воздушного дутья кислородом), нагрева и увеличения расхода воздушного дутья по отношению к подсосам ат-

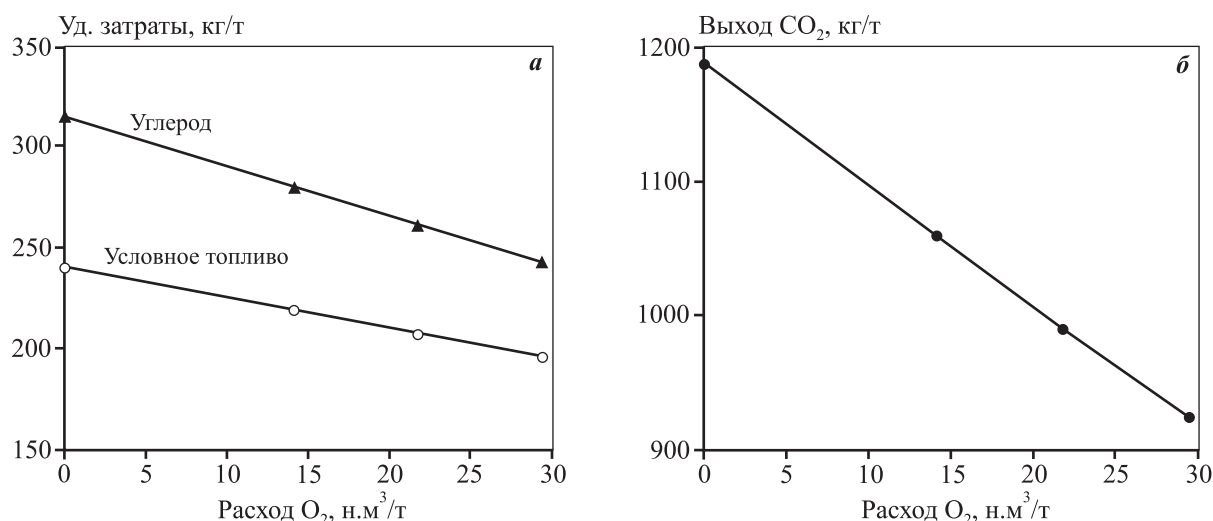


Рис. 2. Зависимости удельных затрат энергоносителей (а) и выхода CO₂ (б) от удельного расхода кислородного дутья при нормальных условиях в расчете на 1 т сырья

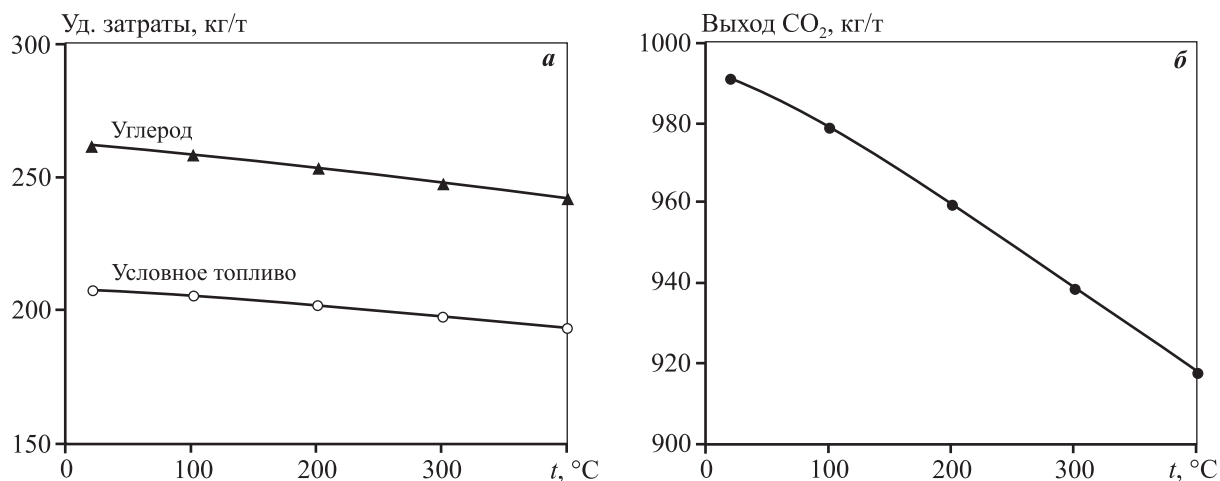


Рис. 3. Зависимости удельных затрат энергоносителей (а) и выхода CO₂ (б) на 1 т сырья от температуры воздушного дутья

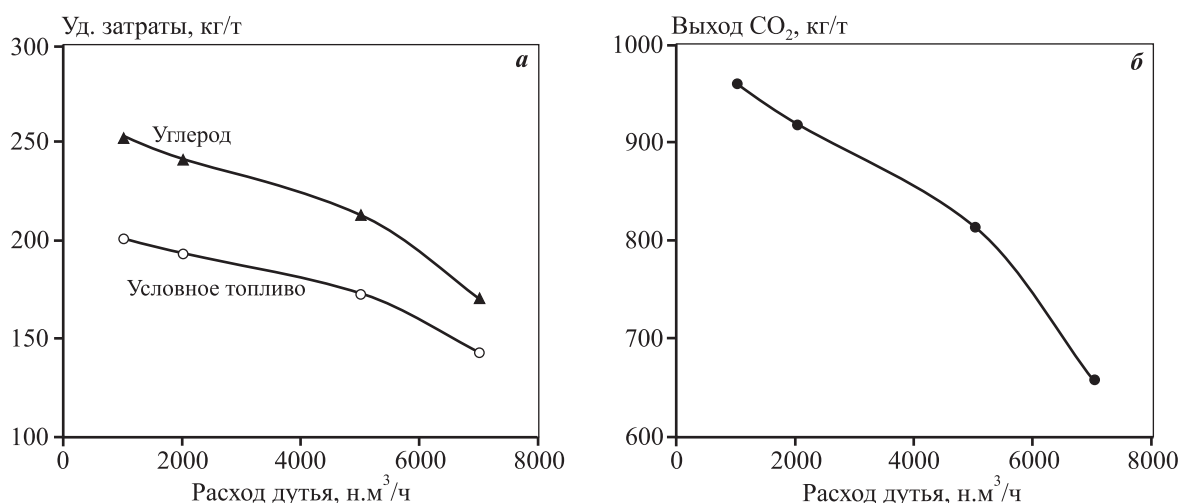


Рис. 4. Зависимости удельных затрат энергоносителей (а) и выхода CO₂ (б) на 1 т сырья от расхода обогащенного кислородом дутья, подогретого до 200 °С

Расход O₂ – 185 н.м³/ч при н.у.

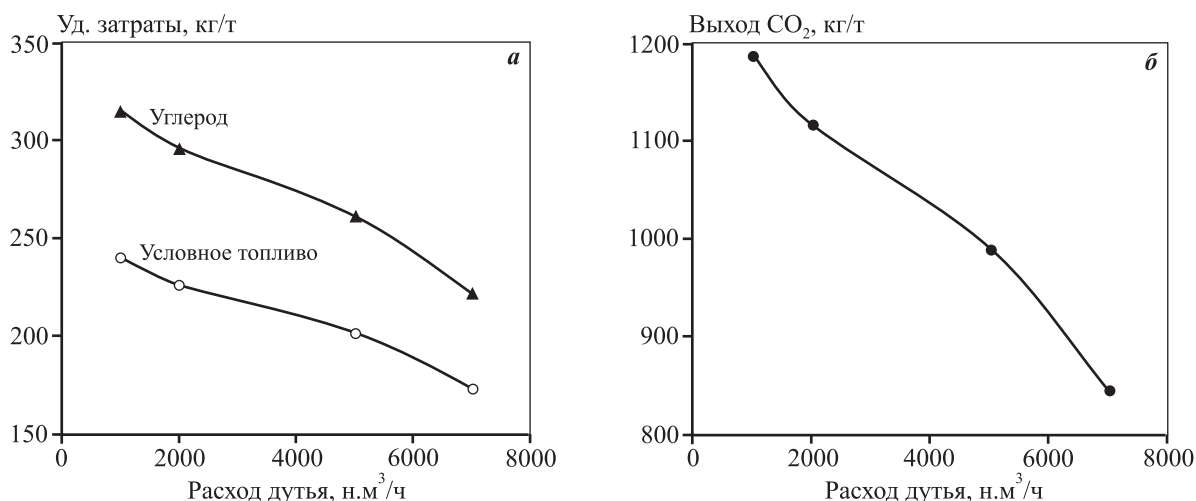


Рис. 5. Зависимости удельных затрат энергоносителей (а) и выхода CO₂ (б) на 1 т сырья от расхода воздушного дутья, подогретого до 200 °С

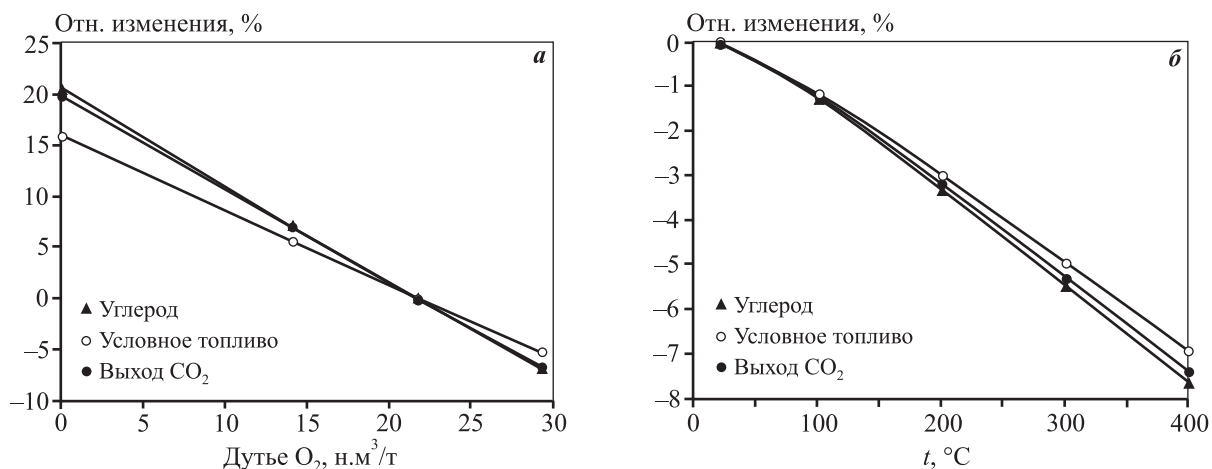


Рис. 6. Относительные изменения затрат энергоносителей и выхода CO₂ при отклонении значений расхода кислорода (а) и температуры воздушного дутья (б) от их базовых параметров (вариант 3, табл. 5 и 6)

Таблица 5
Результаты модельных расчетов вельцевания цинкодержащего сырья

Вариант расчета	Уд. расход углерода, кг/т сырья	Уд. выход CO_2 , кг/т сырья	Расход O_2 (на 100 %), при н.у. $\text{м}^3/\text{т}$ сырья	Подсос воздуха в печь, $\text{м}^3/\text{ч}$ при н.у.	Дутье воздуха в печь		Температура, °С			Выход газов, $\text{н.м}^3/\text{ч}$		Вода, т/т сырья		Удельное потребление электроэнергии, кВт·ч/т сырья				Общ. энергозатраты, кг УТ/т сырья	Пр-во пара, кг/т сырья	Неиспольз. углерод, %
					Расход, при н.у. $\text{м}^3/\text{ч}$	t , °С	t_{max} в слое	Газы из печи	Клинкер из печи	Из печи	Из рукави. фильера	На грануляц. клинкера	На охлажд. газов	Подача воды	Подача дутья	Отсос газов	Пр-во O_2			
1	315,88	1188,39	0,00	12566	1000	20	1250	823	1000	18793	21017	2,40	1,23	0,75	0,65	4,86	0,00	6,26	1231	39,73
2	281,01	1060,63	14,03	10651	1000	20	1250	781	986	16851	18774	2,30	1,05	0,69	0,65	4,34	29,92	35,60	1054	38,86
3*	262,10	991,33	21,62	9599	1000	20	1250	753	980	15782	17542	2,26	0,96	0,66	0,65	4,06	46,13	51,50	957	38,32
4	244,20	925,74	29,22	8585	1000	20	1250	724	975	14750	16359	2,22	0,86	0,63	0,65	3,78	62,34	67,40	864	37,73
5	258,78	979,16	21,62	9469	1000	100	1250	749	980	15636	17376	2,25	0,94	0,66	0,65	4,02	46,13	51,45	943	38,22
6	253,51	959,87	21,62	9268	1000	200	1250	742	980	15411	17118	2,24	0,92	0,65	0,65	3,96	46,13	51,39	921	38,05
7	247,84	939,10	21,62	9049	1000	300	1250	734	981	15166	16838	2,23	0,90	0,64	0,65	3,90	46,13	51,31	898	37,86
8	242,17	918,32	21,62	8828	1000	400	1250	726	981	14919	16556	2,22	0,87	0,64	0,65	3,83	46,13	51,24	874	37,66
9	242,17	918,32	21,62	7810	2000	200	1250	726	980	14900	16534	2,22	0,87	0,64	1,29	3,82	46,13	51,88	872	37,66
10	213,82	814,46	21,62	3677	5000	200	1250	682	990	13639	15092	2,16	0,75	0,60	3,23	3,49	46,13	53,45	754	36,33
11	171,71	660,13	21,62	57	7000	200	1250	580	1002	11816	13016	2,08	0,56	0,54	4,52	3,01	46,13	54,20	561	33,46
12	296,44	1117,16	0,00	10803	2000	200	1250	804	998	17950	20043	2,35	1,15	0,72	1,29	4,64	0,00	6,65	1150	39,30
13	262,02	991,03	0,00	6433	5000	200	1250	764	994	16434	18296	2,26	1,00	0,67	3,23	4,23	0,00	8,13	1005	38,32
14	222,73	847,10	0,00	2895	7000	200	1250	695	986	14700	16318	2,18	0,82	0,62	4,52	3,77	0,00	8,91	821	36,90

Примечание. Звездочкой отмечен базовый вариант; концентрация O_2 в технологическом кислороде принималась 96 об.%; расход мазута по всем вариантам составил 10 кг/т сырья.

мосферного воздуха ведет не только к снижению удельного расхода углеродного материала, но и к повышению степени использования углерода, максимальное расчетное значение которого составило 6,2 отн.%. от 60,3 % (на холодном воздушном дутье без кислорода) до 66,5 % (на нагретом до 200 °С воздушно-кислородном дутье (7000 н.м³/ч при н.у. воздуха и 185 н.м³/ч при н.у. кислорода) без подсосов атмосферного воздуха).

Еще более наглядно влияние исследованных факторов на удельные показатели расхода энергоносителей и выход парниковых газов проявляется в сравнении расчетных изменений этих показателей по отношению к базовому варианту (табл. 6, рис. 6 и 7).

Для охлаждения отходящих газов печей вельцевания применяются котлы-утилизаторы тепла. В модельных расчетах принималось образование острого пара с $t = 200$ °С и снижение температуры отходящих печных газов от 735—950 °С (после их дожигания в пылевой камере) до 200 °С с образованием 0,56—1,23 т пара на 1 т сырья. При полезном использовании этого пара в энерготехнологических целях появляется потенциальная возможность частичной регенерации затрат энергоносителей до 47—246 кВт·ч (6—30 кг условного топлива) на 1 т сырья, или 4,0—12,4 отн.% от их общих затрат.

Выводы

1. Введение в процесс дополнительного кислородного дутья в количестве 120—250 н.м³/ч при н.у., или 14—29 н.м³/т сырья при н.у., позволяет на 13—27 % снизить удельные затраты углеродных материалов и выбросы CO_2 , а также сократить на 10—21 % общие удельные затраты энергоносителей по отношению к использованию холодного воздушного дутья.

2. Нагрев воздушного дутья менее эффективен, чем применение кислорода, так как увеличение температуры

Таблица 6

Относительные изменения затрат энергоносителей и выхода CO₂ от базового варианта

Вариант расчета	Расход углерода, кг/т сырья	Воздушное дутье		Расход техн. O ₂ , м ³ /т сырья при н.у.	Подсос воздуха в печь, м ³ /ч при н.у.	Отклонение от базового варианта, отн. %			
		Расход, м ³ /ч при н.у.	t, °C			Углерод	Электро-энергия	УТ	CO ₂
1	315,88	1000	20	0,00	12566	20,52	−87,85	15,91	19,88
2	281,01	1000	20	14,03	10651	7,22	−30,86	5,60	6,99
3*	262,10	1000	20	21,62	9599	0,00	0,00	0,00	0,00
4	244,20	1000	20	29,22	8585	−6,83	30,89	−5,24	−6,62
5	258,78	1000	100	21,62	9469	−1,27	−0,08	−1,15	−1,23
6	253,51	1000	200	21,62	9268	−3,28	−0,21	−2,97	−3,17
7	247,84	1000	300	21,62	9049	−5,44	−0,35	−4,93	−5,27
8	242,17	1000	400	21,62	8828	−7,60	−0,49	−6,90	−7,36
9	242,17	2000	200	21,62	7810	−7,60	0,75	−6,86	−7,36
10	213,82	5000	200	21,62	3677	−18,42	3,79	−16,56	−17,84
11	171,71	7000	200	21,62	57	−34,49	5,25	−31,06	−33,41
12	296,44	2000	200	0,00	10803	13,10	−87,09	9,22	12,69
13	262,02	5000	200	0,00	6433	−0,03	−84,21	−2,58	−0,03
14	222,73	7000	200	0,00	2895	−15,02	−82,70	−16,10	−14,55

* Базовый вариант.

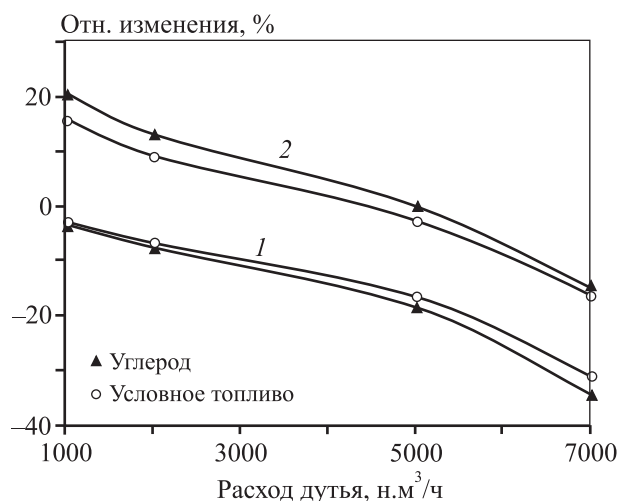


Рис. 7. Относительные изменения затрат энергоносителей при отклонении расхода воздушного дутья, нагретого до 200 °C, от его базового значения (вариант 3, табл. 5 и 6)

1 – с дополнительным дутьем O₂ с расходом 185 н.м³/ч при н.у.;
2 – без дутья O₂

дутья от 20 до 400 °C позволяет уменьшить удельные затраты углеродных материалов и выбросы CO₂ лишь на 7,6 %, а общие удельные затраты энергоносителей – на 6,9 %.

3. Наибольшее снижение удельных расходов энергоносителей и выхода CO₂ наблюдается при использовании подогретого до 200 °C воздушного дутья с увеличением его расхода от 1000 до 7000 н.м³/ч при н.у. и сопутствующим снижением подсоса атмосферного воздуха. Модельные расчеты показали сходные относительные изменения исследуемых расходных показателей как с использованием дополнительного кислородного дутья (185 н.м³/ч при н.у.), так и без него. Расчетное сокращение удельных затрат углеродных материалов и выбросов CO₂ составило 30,2–35,5 %, а общих удельных затрат энергоносителей – 28–32 %. При этом подогрев дутья до 200 °C в воздухоподогревателе котла-утилизатора не требует дополнительных энергозатрат в отличие от варианта использования кислородного дутья, где электроэнергия расходуется на производство кислорода.

4. Интенсификация процесса вельцевания с использованием дополнительного кислородного дутья (или обогащения воздушного дутья кислородом), нагрева воздушного дутья и его увеличения по отношению к подсосам атмосферного воздуха ведет не только к снижению удельного расхода углеродного материала, но и к повышению

степени использования углерода, максимальное значение которой составило 6,2 отн. %.

5. Поддержание оптимального окислительно-восстановительного и теплового режимов процесса требует корректного регулирования тягодутьевого режима печи с учетом подсосов атмосферного воздуха в разгрузочной головке печи. Несогласованные изменения удельных расходов сырья, углерода, дутья и разрежения в пылевой камере ведут к сопутствующему снижению извлечения цинка в вельц-оксиды и увеличению его потерь с клинкером.

Литература/References

1. Бекетов В.Е., Лобов А.А., Чамара О.А., Евтухова Г.П., Свиринов А.В. Киотский протокол как первый шаг на пути решения проблемы глобального потепления климата. *Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб.* 2008. No. 81. С. 111—120.
Beketov V.E., Lobov A.A., Chamara O.A., Evtukhova G.P., Svirin A.V. The Kyoto Protocol as the first step towards solving the problem of global warming. *Kommunal'noe khozyaistvo gorodov*. 2008. No. 81. P. 111—120 (In Russ.).
2. Юлкин М.А. Киотский протокол и возможности сокращения выбросов парниковых газов в металлургической отрасли России. *Металлург.* 2007. No. 4. С. 32—34.
Yulkin M.A. The Kyoto Protocol and opportunities to reduce greenhouse gas emissions in the metallurgical industry of Russia. *Metallurg.* 2007. No. 4. P. 32—34 (In Russ.).
3. Сорохтин О.Г. Парниковый эффект: Миф и реальность. *Вест. РАН.* 2001. Т.1. No. 1. С. 6—7.
Sorokhtin O.G. Greenhouse effect: Myth and reality. *Vestnik RANS*. 2001. Vol.1. No. 1. P. 6—7 (In Russ.).
4. Malti G. Reduction of greenhouse gas pollution in non-ferrous metal industry: Indian perspective. In: *Mater. Sci. Eng. Environmental and Waste Management. EWM-1998* (Eds. A. Bandpadhyay, N.G. Goswami, P. Ramachandra Rao). Jamshedpur: Director NML, 1998. P. 79—86.
5. Kargulewicz I. Air emissions of selected substances from particular sectors including metallurgy in Poland. *Mater. Sci. Eng. Archives of Foundry Engineering*. 2017. Vol. 17. P. 83—86.
6. Sarker T., Corradetti R., Zahan M. Energy sources and carbon emissions in the iron and steel industry sector in South Asia. *Mater. Sci. Eng. Int. J. Energy Economics and Policy*. 2013. Vol. 3. No. 1. P. 30—42.
7. Сталинский Д.В., Литвиненко В.Г., Каневкой А.Л., Андреева Т.А. Особенности и прогнозирование эмиссии парниковых газов на металлургических предприятиях Украины. *Металл и горнорудная пром-сть*. 2010. No. 2. С. 239—243.
Stalinskii D.V., Litvinenko V.G., Kanevkoi A.L., Andreeva T.A. Features and forecasting of greenhouse gas emissions at metallurgical enterprises of Ukraine. *Metall i gornorudnaya promyshlennost'*. 2010. No. 2. P. 239—243 (In Russ.).
8. Yanjia W., Chandler W. The Chinese nonferrous metals industry — energy use and CO₂ emissions. *Mater. Sci. Eng. Energy Policy*. 2010. Vol. 38. P. 6475—6484.
9. Zhili Du, Boqiang Lin. Analysis of carbon emissions reduction of China's metallurgical industry. *Mater. Sci. Eng. J. Cleaner Production*. 2018. Vol. 176. P. 1177—1184.
10. Kundak M., Lazic L., Crnko J. CO₂ Emissions in the steel industry. *Mater. Sci. Eng. Metallurgy*. 2009. No. 48 (3). P. 193—197.
11. Мантула В.Д., Спирина С.В., Каневский А.Л. Оценка выбросов парниковых газов предприятиями горно-металлургического комплекса Украины. *Экология и пром-сть России*. 2008. No. 3. С. 59—62.
Mantula V.D., Spirina S.V., Kanevskii A.L. Assessment of greenhouse gas emissions by enterprises of the mining and metallurgical complex of Ukraine. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2008. No. 3. P. 59—62 (In Russ.).
12. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Лакомкин В.Ю. Энергосбережение и выбросы парниковых газов (CO₂). СПб.: СПбГТУРП, 2014.
Belousov V.N., Smorodin S.N., Lakomkin V.Yu. Energy saving and greenhouse gas emissions (CO₂). SPb.: St. Petersburg State Technological University of Plant Polymers, 2014 (In Russ.).
13. Демидик В.Н. Парниковый эффект и производство стали. *Металл и литье Украины*. 2011. No. 5 (216). С. 29—33.
Demidik V.N. Greenhouse effect and steel production. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2011. No. 5 (216). P. 29—33 (In Russ.).
14. Козлов П.А. Вельц-процесс. М.: ИД «Руда и металлы», 2002.
Kozlov P.A. Waelz process. Moscow: Ruda i metally, 2002 (In Russ.).
15. Абдеев М.А., Колесников А.В., Ушаков Н.Н. Вельцевание цинк—свинец содержащих материалов. М.: Металлургия, 1985.
Abdeev M.A., Kolesnikov A.V., Ushakov N.N. Waelz processing of zinc-lead-containing materials. Moscow: Metallurgiya, 1985 (In Russ.).
16. Снурников А.Г. Комплексное использование сырья в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1998.
Snurnikov A.G. Complex use of raw materials in non-

- ferrous metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 1998 (In Russ.).
17. *Шиврин Г.Н.* Металлургия свинца и цинка. М.: Металлургия, 1998.
Shivrin G.N. Metallurgy of lead and zinc. Moscow: Metallurgiya, 1998.
18. *Уткин Н.И.* Цветная металлургия. М.: Металлургия, 1990.
Utkin N.I. Non-ferrous metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 1990 (In Russ.).
19. *Бездежский Г.Н., Чиркова В.С., Шестакова Л.А., Датков С.П.* Способ переработки цинксодержащих материалов вельцеванием: А.с. No. 990844 (СССР). 1983.
Bezdezhskii G.N., Chirkova V.S., Shestakova L.A., Datkov S.P. A method of zinc-containing materials waelz processing: Author's certificate No. 990844 (USSR). 1983 (In Russ.).
20. *Огиенко А.С., Абдеев М.А.* Способ вельцевания окисленных материалов, содержащих цинк и другие цветные металлы: А.с. No. 634624 (СССР). 1988.
Ogienko A.S., Abdeev M.A. A method of waelz processing of oxidized materials containing zinc and other non-ferrous metals: Author's certificate No. 634624 (USSR). 1988 (In Russ.).
21. *Бездежский Г.Н., Ходов Н.В., Вдовиченко Н.С., Бабушкин В.Н., Туганов К.И., Качмазов К.Г., Борисенко В.Г., Перунков В.В.* Способ вельцевания цинксодержащих материалов: А.с. No. 1249070 (СССР). 1986.
Bezdezhskii G.N., Khodov N.V., Vdovichenko N.S., Babushkin V.N., Tuganov K.I., Kachmazov K.G., Borisenko V.G., Perunkov V.V. A method of waelz processing of zinc-containing materials: Author's certificate No. 1249070 (USSR). 1986 (In Russ.).
22. *Козлов П.А., Паньшин А.М., Затонский А.В., Решетников Ю.В., Дегтярев А.М., Ивакин Д.А.* Способ вельцевания цинковых кеков: Пат. 2496895 (РФ). 2013.
Kozlov P.A., Pan'shin A.M., Zatonskii A.V., Reshetnikov Yu.V., Degtyarev A.M., Ivakin D.A. A method of zinc cake waelz processing: Pat. 2496895 (RF). 2013 (In Russ.).
23. *Hunt A.G., Grimsey E.J., Gray N.B.* Simulation of the kalgoorlie nickel smelter flowsheet using METSIM. In: *Proc. of the 5-th Extractive Metallurgy Conference. AusIMM.* 1991. P. 251—255.
24. *Walker M.J.* KIVCET smelter on-stream at trail. *Mining Journal.* 1998. Vol. 178, No. 4. P. 256—263.
25. *Kulnova N., Onalbaeva Zh., Akhmetvaliyeva Z., Shumskij V.* Modeling of the materials burning processes in the rotating tube furnaces. *International Journal of Trend in Research and Development (IJTRD).* ICASIT. 2017. P. 97—99.
26. *Герасимов С.Г., Каган Я.Н., Лебедев П.Д., Лукницкий В.В., Шейндлин А.Е.* Теплотехнический справочник. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. Т. 1.
Gerasimov S.G., Kagan Ya.N., Lebedev P.D., Luknitskii V.V., Sheindlin A.E. Thermal engineering reference book. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1957. Vol. 1 (In Russ.).