

# МЕТАЛЛУРГИЯ

---

---

МРНТИ 53.03.03

*Е.Е. Жолдасбай<sup>1</sup>, Н.К. Досмухамедов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,  
Алматы қ., Қазақстан

## ШЛАКТЫ ТОТЫҚСЫЗДАНДЫРЫП КЕДЕЙЛЕНДІРУ КЕЗІНДЕ ТҮСТІ МЕТАЛДАРДЫҢ, ТЕМІРДІҢ ЖӘНЕ МЫШЬЯКТЫҢ ӨНІМДЕР АРАСЫНДА БӨЛІНІП ТАРАЛУЫ

---

---

**Түйіндеме.** Жиналған және ағымдағы шлак қалдықтарының ауқымды келемінің есуі, бағалы металдарды алу үшін қосымша шикізат кезі ретінде оларды пайдаланудың жаңа тәсілдері мен шешімдерін іздестіруді талап етеді. Күрделі химиялық құрамымен және жоғары мыс мелшерімен сипатталатын, автогенді балқыту және/немесе үздіксіз конвертерлеу шлактары ерекше қызығушылықты тудырады. Берілген жұмыста тәжірибелік зерттеулер негізінде, мыс мелшері жоғары шлактарды кемірмен кедейлендіру барысында алынған балқыту өнімдері арасында түсті металдардың, темірдің және мышьяқтың бөлініп таралуы орнатылды. Тотықсыздандырғыштың (кемір) әртүрлі шығынында балқыту өнімдері арасында металдардың: мыс, темірді – мыс-темір металл қорытпасына; қорғасын, мырышты газ фазасына және мышьяқты – газ бен бір бөлігін қорытпаға селективті белудің принципіалды мүмкіндігі көрсетілді. Шлақты кедейлендіру шарттарында мышьяқтың бөліну тәртібінің күрделі механизмі орнатылды: жоғары кемір шығынында газ фазасына мышьяқтың жоғары бөлінуіне қол жеткізу мүмкін емес. Газ фазасына мышьяқтың төмен бөлінуі (~45%), қорытпада темір мелшері артқан сайын, мышьяқтың қорытпаға жоғары мелшерде етіп кетуімен түсіндіріледі. Алынған нәтижелер оңтайлы технологиялық көрсеткіштер мен режимдерді таңдау тұрғысынан принципіалды мәнге ие, олар мыс мелшері жоғары шлактарды тотықсыздандырып кедейлендіру тәсілдерін ұйымдастыру кезінде балқыту өнімдері арасында металдардың тепе-тең таралуын қамтамасыз етеді.

**Түйінді сөздер:** шлак, кедейлендіру, тотықсыздандыру, кемір, мыс, мышьяк, таралуы, қорытпа, ұшқындар, бөліп алу.

...

**Аннотация.** Большие объемы накопленных и рост выхода объемов текущих шлаковых отходов требует изыскания новых подходов и решений по их использованию в качестве дополнительного источника сырья для извлечения ценных металлов. Особый интерес представляют шлаки автогенных плавов и/или непрерывного конвертирования, характеризующихся сложным химическим составом и высоким содержанием меди. В настоящей работе на основании экспериментальных исследований установлено распределение цветных металлов, железа и мышьяка между продуктами плавки, полученными при

обеднении высокомедистых шлаков углем. Показана принципиальная возможность селективного разделения металлов по продуктам плавки в условиях различного расхода восстановителя (угля): меди, железа – в медно-железистый металлический сплав; свинца, цинка в газовую фазу и мышьяка – в газ и частично в сплав. Установлен сложный механизм поведения мышьяка в условиях обеднения шлака: при высоких расходах угля не удается достичь высокого извлечения мышьяка в газовую фазу. Показано, что низкое извлечение мышьяка в газовую фазу (~45%) объясняется повышенным его переходом в сплав с ростом содержания железа в сплаве. Полученные результаты имеют принципиальное значение с точки зрения выбора оптимальных технологических параметров и режимов, обеспечивающих равновесное распределение металлов между продуктами плавки при организации восстановительных способов обеднения высокомедистых шлаков.

**Ключевые слова:** шлак, обеднение, восстановление, уголь, медь, мышьяк, распределение, сплав, возгоны, извлечение.

• • •

**Abstract.** Large volumes of accumulated and growth in the yield of volumes of current slag waste require the search for new approaches and solutions for their use as an additional source of raw materials for the extraction of valuable metals. Of particular interest are slags of autogenous heats and / or continuous conversions, characterized by complex chemical composition and high copper content. In the present work, on the basis of experimental studies, the distribution of non-ferrous metals, iron and arsenic among the smelting products obtained by depletion of high-copper slags by coal was established. The principal possibility of the selective separation of metals according to the smelting products under the conditions of different consumption of reducing agent (coal) is shown: copper, iron - in a copper-ferrous metal alloy; lead, zinc in the gas phase and arsenic - in the gas and partly in the alloy. A complex mechanism of arsenic behavior under conditions of slag depletion has been established: with high coal consumption, it is not possible to achieve high recovery of arsenic into the gas phase. It was shown that low recovery of arsenic into the gas phase (~ 45%) is due to its increased transition to the alloy with an increase in the iron content in the alloy. The results obtained are of fundamental importance from the point of view of choosing the optimal technological parameters and regimes that ensure the equilibrium distribution of metals between the smelting products when organizing recovery methods for the depletion of high-copper slags.

**Keywords:** slag, depletion, recovery, coal, copper, arsenic, distribution, alloy, sublimes, extraction.

**Кіріспе.** Тиімділігі жоғары автогенді процестерді пайдалану есебінен тауарлы мыс шығару келемін ұлғайтуға бағытталған мыс ендірісінің жалпы тұжырымдамасы мыс мелшері жоғары шлактардың ауқымды есуімен жүреді. [1] жұмыста Нор-Па-де-Кал (Франция) енеркәсілтік бассейнінде ~4 млн.тонна металлургиялық шлактардың жиналуы жөнінде ақпарат берілген, олар құрамында қорғасын, мы-

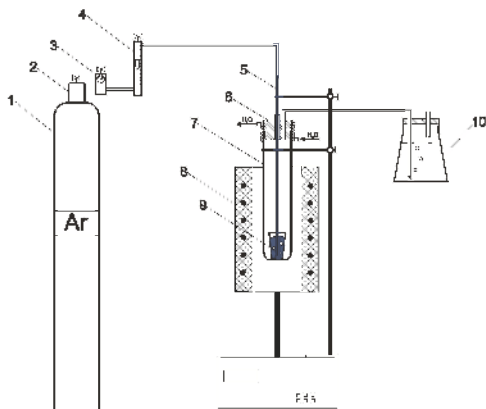
рыш, мышьяк мелшері жоғары болғандықтан, қоршаған ортаға негізделген кері әсерін тигізеді. Авторлардың пайымдауынша, берілген шлактардан әртүрлі тәсілдермен бағалы металдарды бөліп алу үшін оларды шикізат ретінде пайдалануға болады [2-5].

[6] жұмыста қызықты деректер келтірілген, мұнда мыс ендірісінің әрбір тоннасына шамамен 2,2 тонна шлак ендірілетіні айтылған. Бүкіләлемдік мыс ендірісінен жыл сайын шамамен 24,6 тонна шлак түзіледі. Авторлардың айтуынша, құрамында 0,8% мыс болатын шлактар не қалдық ретінде тасталынады, не табиғи базальтқа (кристалдық) ұқсас қасиеттеріне ие енім ретінде сатылады. Шлақты басқарудың ағымды нұсқаларының бірі – оларды еңдеу, металды бөліп алу, жоғары құн қосылған енім ендірісі мен шлак үйінділерін жою болып табылады.

Балқыту шлактарынан мысты тиімді бөліп алу сұрақтарына зерттеулердің ауқымды саны белінген, ұйымдастыру тәсілімен әртүрлі аппаратуралық рәсімделумен және әрбір әдістің негізіне салынған процестермен ерекшеленетін, мыс балқыту шлактарын кедейлендірудің кептеген нұсқалары жасалды және тәжірибеге енгізілді [7-13]. Кептеген жұмыстар газ фазасының әртүрлі шарттарына – әлсіз тотықсыздандырғыш, тотықтырғыш немесе күшті тотықтырғыш ( $P_{O_2} < 10^{-10}$  атм) шарттарында жүргізілген ұқсас тәжірибелік зерттеулер әдебиетте ете сирек кездеседі және шлақты кедейлендіру шарттарын егжей-тегжейлі талдау үшін оларды пайдалану күрделі болып келеді. Шлақты кедейлендіру процесін ұйымдастыру бойынша технологиялық шешімдерді жасау үшін, оны жанжақты зерттеу және нақты міндеттер мен шарттардың ескерілуімен талдау қажет. Бұл кезде сульфидті шикізатта және салдары ретінде шлакта мыстың жиі кездесетін серіктестері ретінде қорғасын, мырыш пен мышьяқтың тәртібін зерттеу сұрақтары езекті болып келеді.

Мыс бойынша бай шлактарды кедейлендіру шарттарында берілген қоспалар тәртібінің ерекшеліктері кедейлендіру енімдерінің құрамы мен қасиеттеріне, сонымен қатар, ақырында, олардың технологиялық тізбектің кезекті еңделімдерінде түзілетін сәйкес фазаларға таралуына әсерін тигізеді. Берілген жұмыста мыс бойынша бай шлактарды қатты тотықсыздандырғышпен (кемірмен) және оның жану енімдерімен (СО) кедейлендіру тәсілінің принципіалды мүмкіндігі көрсетілді және балқыту енімдері арасында мыс пен металл-қоспалардың (қорғасын, мырыш, мышьяк) таралу заңдылықтары орнатылды.

**Зерттеу әдістемесі.** Мыс мелшері жоғары шлактарды кемірмен кедейлендіру бойынша сынақтарды жүргізу үшін, жалпы сұлбасы 1-суретте көрсетілген зертханалық қондырғы пайдаланылды.



- 1 – аргон баллоны; 2 – газды вентиль; 3 – газ редукторы; 4 – ротаметр;  
 5 – балқыма үрлеу үшін алунды түтікше; 6 – сумен суытылатын тығын; 7 – кварцты реактор; 8 – құбырлы қыздыру пеші; 9 – елшендісі бар тигель;  
 10 – Дрексель ыдысы.

Сурет 1 – Шлақты кедейлендіру қондырғысының жалпы сұлбасы

**Сынақтарды жүргізу әдістемесі.** Бастапқы металды мыс елшендісі, шлак пен тотықсыздандырғыш-кемір орналасқан тигельді кварцты реакторға тиейді, оны ары қарай пешке орналастырады. Қондырғыны толық орнатқаннан кейін, пешті берілген температураға – 1300°C дейін қыздырады. Пешті қосқан сәттен бастап, бос аймаққа үздіксіз аргон беру басталады. Газ шығыны – 300 мл/мин. Алунды үрлеу түтікшесінің орналасуы – балқыма үсті. Берілген температураға қол жеткізгеннен кейін, сұйық балқыманы 3-5 минут бастапқы елшендінің толық балқуы үшін ұстап тұрады. Ары қарай түтікшені балқымаға түсіреді және балқыманы 60 минут аралығында үрлейді.

Үрлеу аяқталғаннан кейін, балқыту енімдерін толық белу үшін, балқыманы 15 мин аралығында температураны тусірмей тұндырады. Ары қарай пеш суығаннан кейін тигельді реактордан шығарады және суда шынықтырады. Алынған мыс қорытпасын шлактан бөліп алады, елшейді. Шлак пен мыс сынамаларын сандық элементтік талдау жүргізуге жібереді. Барлық сынақтарда бастапқы материал ретінде, Балқаш мыс қорыту зауытында («Қазақмыс» ЖШС) Ванюков пешінде сульфидті мыс концентратын штейнге автогенді балқыту кезінде алынған шлак пайдаланылды. Құрамы, %: 0,62 Cu; 0,37 Pb; 4,47 Zn; 0,04 As; 39,1 Fe; 33,7 SiO<sub>2</sub>; 3,1 CaO; 2,5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,6 MgO; 15,5 – басқалары.

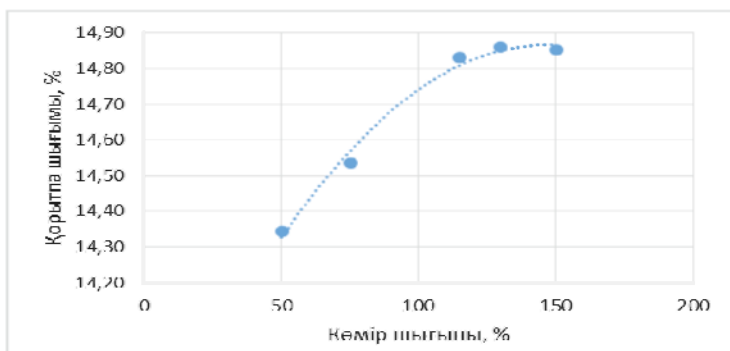
Тотықсыздандырғыш ретінде құрамы келесідей кемір пайдаланылды, %: кеміртеп – 74,0; оттегі – 4,0; күкірт – 0,6; басқалары – 21,4.

Сынақтар, тұсті металдар мен темір, сонымен қатар ілеспелі қоспалар (Pb, Zn, As) тотықтарын тотықсыздандыру үшін қажетті тотықсыздандырғыштың теориялық мөлшерінің 50, 75, 115, 130 және 150% шығынымен жүргізілді. Тотықсыздандырғыш шығыны, 1 моль  $Cu_2O$  және  $FeO$  тотықтарына қайта есептелген мыс пен темірдің жалпы мөлшерінің есебінен таңдалды.

Барлық сынақтарда шлак өлшендісі тұрақты болды және 60 ғ құрады. Түп фазасының бөлінуін қамтамасыз ету үшін тигель тұбіне жалпы массасы 10 ғ болатын таза мыс (99,9 %) кесектерін тиейді.

**Сынақтар нәтижелері және оларды талқылау.** Жүргізілген сынақтар барысында инертті газбен қарқынды барботаждау шарттарында тотықсыздандырғыш (көмір) шығынына тәуелді, мыс мөлшері жоғары шлактарды тотықсыздандырып кедейлендіру кезінде түсті металдар, темір мен мышьяк тәртібі, сонымен қатар сынақтардан кейін алынған қорытпа мен шлак арасында металдардың таралуы зерттелді. Барлығы бес сынақтан тұратын серия жүргізілді, олардың әрқайсысында тотықсыздандырғыш (көмір) шығыны, тұсті металдар мен мышьяк тотықтарын тотықсыздандыру үшін қажетті стехиометриялық мөлшерінің 50, 75, 115, 130 және 150% құрады.

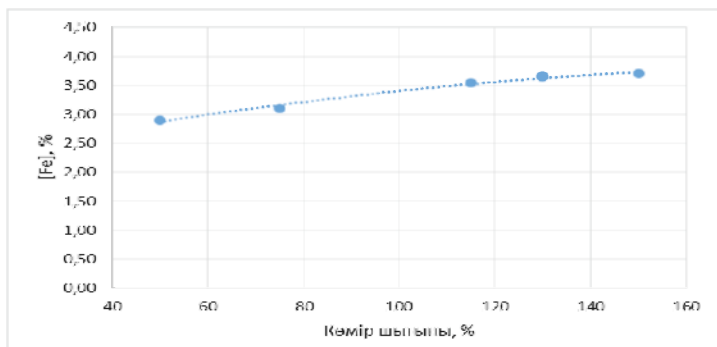
**Кедейлендіру процесінде металл тәртібіне көмір шығынының әсері.** Шлактарды көмірмен кедейлендіру бойынша теңдестік балқыту нәтижелерінің біріншілей салыстырмалы талдауының көрсетуі бойынша, тотықсыздандырғыш шығынының теориялық қажетті мөлшерден 50% -ден 150%-ға жоғарылауы, мыс-темір қорытпасының шығуын ұлғайтады (сурет 2).



Сурет 2 – Мыс-темір қорытпасы шығуының көмір шығынына тәуелділігі

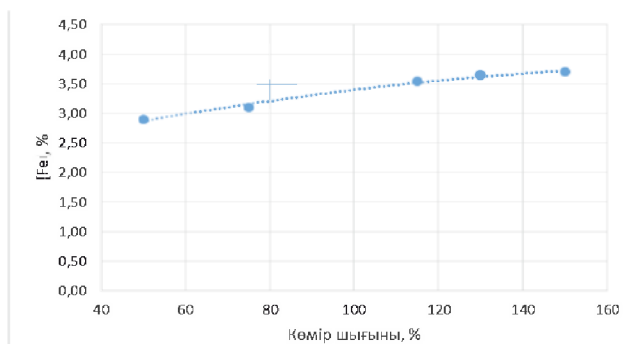
Қорытпаның түзілуі, мыс тотығын көмірмен тотықсыздандыру нәтижесінде алынатын сұйық металды мыс фазасының түзілуі есебі-

нен жүреді. Қорытпада мыс мелшерінің көмір шығынына тәуелділігі 3-суретте көрсетілген.



Сурет 3 – Қорытпада мыс мелшерінің көмір шығынына тәуелділігі

Шлақты көмірмен кедейлендіру шарттарында ез тотығынан тотықсызданған металдан темірдің тузілуі мен туп фазаға етуін құтуға болады, туп фазаның кездесуі қорытпаның жалпы шығуының ұлғаюына әсерін тигізеді. Бұл кезде темірдің қорытпаға етуі көмір шығыны жоғары болған сайын артады. Берілген заңдылық сынақтар нәтижелерімен толық дәлелденді, оны 4-суреттен оңай керуға болады.

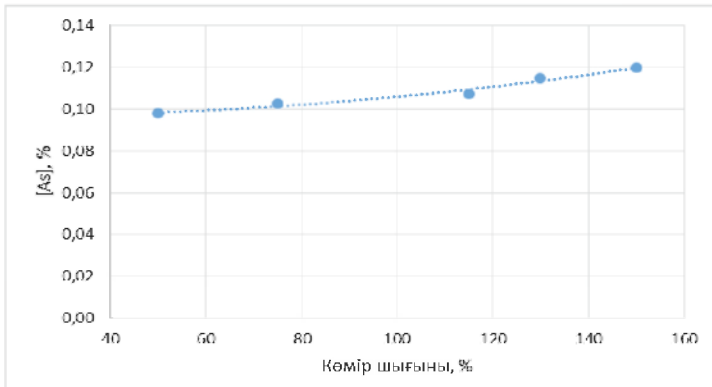


Сурет 4 – Қорытпада темір мелшерінің көмір шығынына тәуелділігі

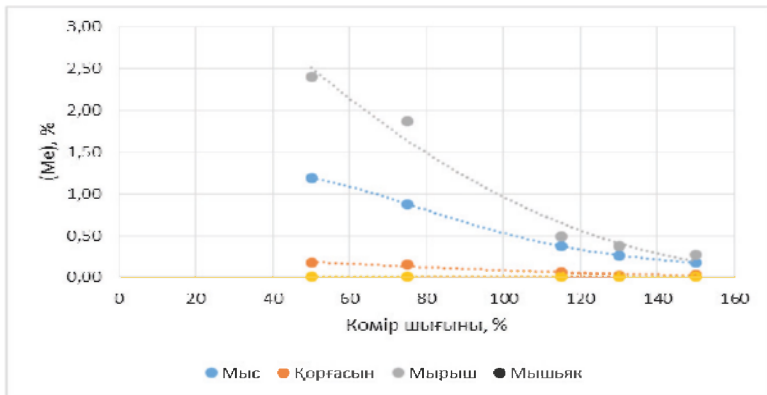
5-суретте керініп тұрғандай, мыс және темірмен қатар, көмір шығыны ұлғайған сайын тупкі фазада, көміртегі тотығымен тотықсыздандыру нәтижесінде тузілетін, металды мышьяқтың да аз мелшерде еруі байқалады. Бұл кезде, қорытпада темір мелшері жоға-

рылаған саиың, оған мышьяқтың етуі де арта түсетіні қызығушылық тудырады.

Шлақты кедейлендіру шарттарында шлак фазасы шығуының 79,6%-дан 75,3% дейін төмендеуі және шаң шығуының 6%-дан ~10% дейін ұлғаюы орнатылды (6-сур.).

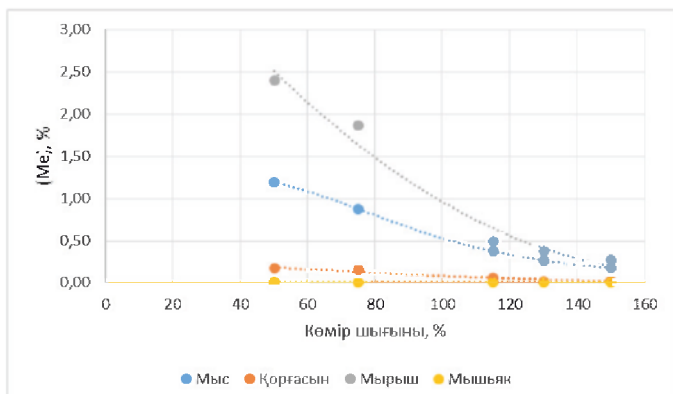


Сурет 5 – Қорытпада мышьяк мелшерінің көмір шығынына тәуелділігі



Сурет 6 – Шлак пен шаң шығуының көмір шығынына тәуелділігі

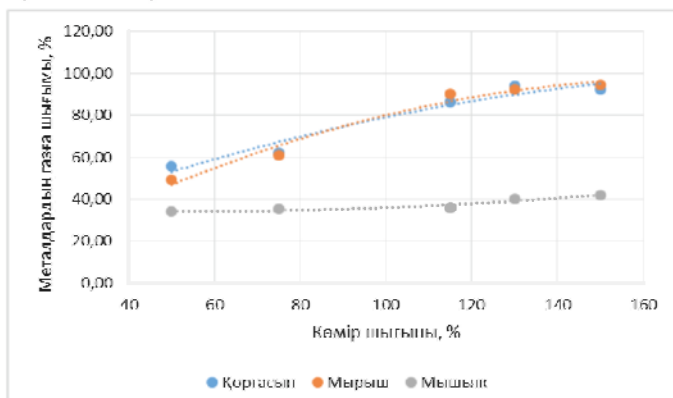
Орнатылған заңдылықтарды балқыту өнімдері арасында металдардың қайта таралу тұрғысынан түсіндіруге болады. Мәселен, 7-суретте тотықсыздандырғыш шығуына тәуелді шлакта мыс пен мырыш мелшерінің айқын төмендеуін керуге болады.



Сурет 7 – Көмір шығынына тәуелді шлакта түсті металдар мен мышыяқ мөлшерінің өзгерісі

Қызықтыратын бір жайт, сынақтарды жүргізу барысында, тіпті балқыманы аргонмен барботаждаудың минималды уақытында (~10 мин.) және тотықсыздандырғыштың аз шығынында, реактордың жоғарғы суық бөлігіне тұнатын, реактордан бөлінетін мырыш тотығының ақ буы айқын керіне бастады. Бұл шлақты көмірмен тотықсыздандыру кезінде, үрлеудің бастапқы сатысында, мырыштың газ фазасына жоғары белінуі байқалатынын көрсетеді. Расымен, 8-суретте келтірілген заңдылық, көмір шығыны ұлғайған сайын газ фазасына мырыштың жеткілікті жоғары белінуін (50% - 95%) көрсетеді.

Газ фазасына қорғасынның беліну сипаты, шамамен мырыш сияқты аралықта орналасқан.

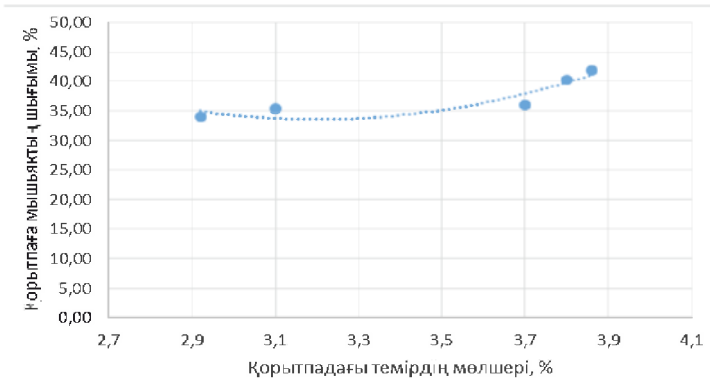


Сурет 8 – Газ фазасына Zn, Pb, As белінуінің көмір шығынына тәуелділігі



Айта кету керек, шлакты көмір көміртегісімен кедейлендіру процесінде, термодинамикалық есептеулер деректері бойынша [14], процесті жүргізу температурасында (1300°С) мышьяк тотығынан оны тотықсыздандыру реакциясының Гиббс энергиясының жоғары мәнінің есебінең, газ фазасына мышьяқтың максималды өтуін құту керек еді. Алайда, 8-суретте көрініп тұрғандай, көмір шығыны жоғарылаған сайын газ фазасына мышьяқтың бөлінуінің өсуі байқалғанымен, сынақтар жүргізудің өзге тең шарттарында алынған мырыш пен қорғасынның газ фазасына бөліну мәндеріне қарағанда, олардың абсолюттік мәндері біршама төмен. Бұл шлакты көмірмен кедейлендіру процесінде мышьяк тәртібінің күрделі механизмін көрсетеді.

Қорытпаға мышьяқтың бөлінуі, оның қорытпадағы темір мөлшеріне тәуелділігін көрсетеді: қорытпада темір мөлшерінің өсуі қорытпаға мышьяк бөлінуін ұлғайтады (9-сурет).



Сурет 9 – Қорытпаға мышьяқтың бөлінуінің қорытпадағы темір мөлшеріне тәуелділігі

Орнатылған заңдылықта қорытпа мен шлакты химиялық талдау деректеріне сәйкес есептелген, қорытпа мен шлак арасында мышьяқтың таралу коэффициенті мәндерінің негізінде түсіндіруге болады (1-кесте).

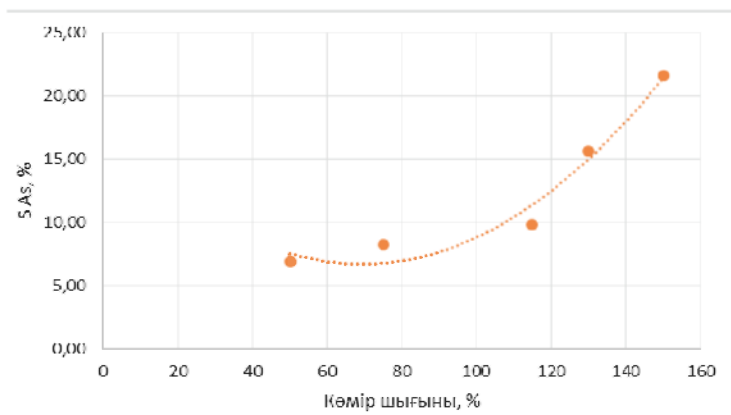
**Кесте 1 – Қорытпа мен шлак арасында мышьяқтың таралу коэффициентінің ( $L_{As}$ ) есептік мәндері**

Қорытпада темір мөлшері, % масс.	Қорытпа мен шлак арасында As таралу коэффициенті, $L_{As}$
2,9	6,94
3,1	8,23
3,7	9,8
3,8	15,63
3,9	21,65

Қорытпа мен шлак арасында мышьяқтың таралу коэффициентінің өзгеру нәтижелері олардың жеткілікті жоғары мәнін және қорытпадағы темір мөлшеріне тәуелді есуін көрсетеді.

Мышьяқтың таралу коэффициенті ( $L_{As}$ ) қисығының кемір шығынына тәуелділік сипатының көрсетуі бойынша, тотықсыздандырғыштың аз шығынында  $L_{As}$  мәні аз ғана жоғарылайды (10-сур.). Оның 9,8-дан ~22% дейін күрт есуі кемірдің жоғары шығынында (115% және одан жоғары) байқалады. Бұл кемірдің аз шығынында, мышьяк тотығын кемірмен тотықсыздандыру нәтижесінде түзілетін металды мышьяқтың бір бөлігі сұйық металды мыста еритінін және бір бөлігі газдармен айдалатынын көрсетеді.

Жоғары кемір шығынында, қорытпада металды темір мөлшерінің ұлғаюы балқыту енімдері арасында мышьяқтың қайта таралуына ауқымды әсерін тигізетін болады.



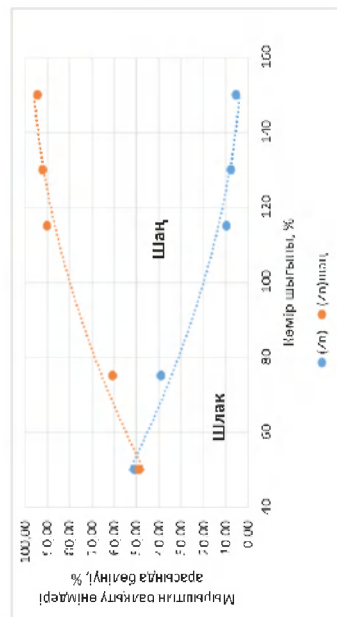
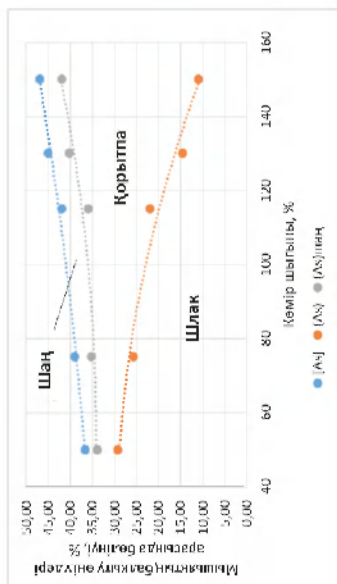
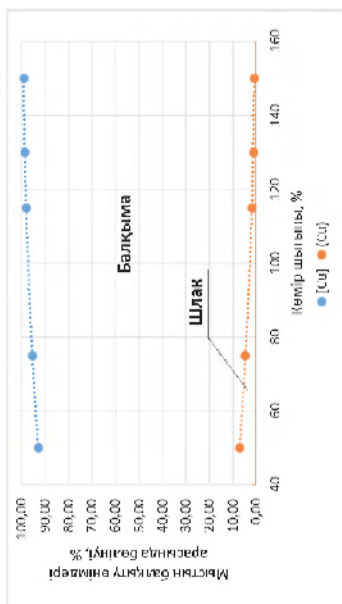
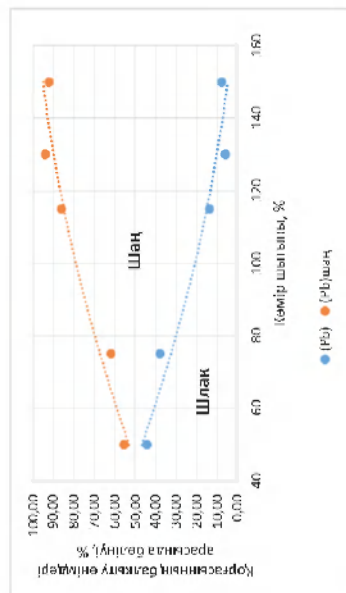
Сурет 10 – Қорытпа мен шлак арасында мышьяқтың таралу коэффициентінің ( $L_{As}$ ) кемір шығынына тәуелділігі

Металды мышьяк металды темірмен әрекеттесе отырып, тұрақты, ұшқыш емес темірдің мышьякпен қосылыстарын (интерметаллидтер) тұзетін болады, олар кейіннен қорытпада шоғырланады және қорытпадағы мышьяк мелшерін арттырады.

Сынақтар нәтижелерінің керсетуі бойынша, түпкі фазаға мысты максималды белу мақсатымен шлакты терең тотықсыздандыру үшін, жоғары кемір шығынын қамтамасыз ету қажет (металл тотықтарын тотықсыздандыру үшін қажетті стехиометриялық мелшерден 150% дейін). Екінші жағынан, қорытпаға мышьяқтың етуін төмендету үшін қорытпада темір мелшерін азайту шарттарын қамтамасыз ету қажет. Оған кемір шығынын, металл тотықтарын тотықсыздандыру үшін қажетті оның стехиометриялық шығынынан 115%-ға дейін азайту арқылы қол жеткізуге болады. Бұл кезде қорытпада мышьяк мелшері минималды (0,05%) болады. Алайда, бұл жағдайда керсетілген кемір шығыны мыстың шлактан қорытпаға жеткілікті толық белінуін қамтамасыз етпейді (шлакта мыс мелшері жоғары болып қалады ~0,5%, сур.7).

Осылайша, шлактан мысты аса терең беліп алу мақсатымен кемір шығынын ұлғайту тиімсіз болып келеді: кемір шығынын арттыру қорытпада темір мелшерінің ұлғаюына әкеледі, ол ез қатарына мышьяқтың қорытпаға етуі үшін жағымды шарттар құрайды. Нәтижесінде, құрамында мышьяк кездесетіндіктен, сапасының нашарлауы салдарынан қорытпаны мақсаты бойынша ары қарай пайдалану тоқтатылады. Оған қоса, кемір шығынының азаюы ғаз фазасына қорғасын мен мырыштың белінуіне кері әсерін тигізеді (8-сур.).

**Балқыту енімдері арасында металдардың таралуы.** Жоғарыда айтылғандай, шлакты кедейлендірудің негізгі міндеті, мыстың шлактан түпкі фазаға (мыс-темір қорытпасы), ал ілеспелі металл-қоспаларының (Pb, Zn, As) ғаз фазасына максималды белінуін қамтамасыз ететін, балқыту енімдері арасында металдардың тепе-тең таралу шарттарын анықтау болып келеді. Сынақтарда қол жеткізген кемірдің балқымамен толық игерілуі, сонымен қатар тотықсыздандырғыш шығыны мен қорытпада темір мелшері арасында алынған айқын корреляция, шлакты кемірмен кедейлендіру барысында алынатын сәйкес енімдерге түсті металдар мен мышьяқтың таралуын есептеуге мүмкіндік береді. Кемір шығынына тәуелді, балқыту енімдері – қорытпа, шлак пен ғаз фазасы арасында тұсті металдар (Cu, Pb, Zn) мен мышьяқтың таралуы 11-суретте келтірілген.



Сурет 11 – Шлақты көмірмен келілет-д-ру өнімдері арасында түсті металдар мен мыштың бөлінуі

Шлак пен қорытпа арасында металдардың тепе-тең таралуы бойынша аса үздік нәтижеге, металл тотықтарын тотықсыздандыру үшін қажетті кемірдің стехиометриялық шығынынан 115%-ға тең кемір шығынымен шлакты тотықсыздандырғышпен еңдеу кезінде қол жеткізілді. Металл тотықтарын тотықсыздандыру үшін қажетті стехиометриялық шамадан 150%-ға дейін кемір шығынының ұлғаюы түсті металдардың нақты енімдерге максималды белінуіне әкеледі: қорытпаға мыстың белінуі – 99,1% құрайды; ғаз фазасына қорғасын мен мырыштың белінуі ~95%. Бұл кезде соңғы шлакта мыстың қалдық мелшері 0,17%, Zn – 0,25%, Pb – 0,12% құрайды. Екінші жағынан, керсетілген кемір шығыны қажетсіз құбылысқа – темірдің қорытпаға ауқымды етуіне әкеледі, ол ез қатарына, қорытпада мышьяк мелшерінің есуіне әкеледі. Қорытпада мышьяқтың кездесуі, физика-химиялық қасиеттерінің нашарлауы, сонымен қатар алынатын тауарлы енімдердің соңғы сапасына әсер етуі салдарынан, мақсатты бағыты бойынша оның ары қарай пайдаланылуын шектейді.

Кемір шығынын азайту (металл тотықтарын тотықсыздандыру үшін қажетті стехиометриялық шаманың ~115%) есебінен ғаз фазасының қорғасынмен және мырышпен қанығу дәрежесінің төмендеуі, қорытпаға мышьяқтың етуін айтарлықтай екі есеге қысқартуға мүмкіндік береді. Алайда қарқынды массаалмасу мен аз кемір шығыны шарттарында, шлакта мыстың қалдық мелшері жоғары болғандықтан, мұндай режимді жүзеге асыру мүмкін емес.

Алынған нәтижелер, термодинамикалық талдау [14] нәтижесінде орнатылған, шлакты кемірмен тотықсыздандырып кедейлендіру кезінде мыс, қорғасын, мырыш пен мышьяк тәртібінің заңдылықтарын толығымен растайды. Мышьякпен жағдайда, интерметаллидтер түрінде мышьяқтың мыспен және темірмен қосымша қосылысының түзілуін ескеру қажет, олар донды фазада ери отырып, мыс-темір қорытпасына етеді. Бұл мыс мелшері жоғары шлактарды кемірмен кедейлендіру шарттарында нақты енімдерге түсті металдар мен мышьяқты кешенді беліп алу бойынша максималды нәтижелерге қол жеткізу мүмкін еместігін керсетеді. Дегенмен, алынған нәтижелер шлактарды түсті металдар бойынша кедейлендіру үшін әбден жарамды.

**Қорытынды.** Мыс мелшері жоғары шлактарды кемірмен тотықсыздандыру шарттарында балқыту енімдері бойынша металдарды селективті белудің принципіалды мүмкіндігі керсетілді: мыс, темірді – мыс-темір металл қорытпасына; қорғасын, мырышты – ғаз фазасына және мышьяқты ғаз бен бір белігін қорытпаға.

Шлакты кедейлендіру шарттарында мышьяк тәртібінің күрделі механизмі орнатылды: жоғары кемір шығынында ғаз фазасына мышьяқтың жоғары белінуіне қол жеткізу мүмкін емес. Мышьяқтың ғаз фазасына аз (~45%) белінуі, қорытпада темір мелшері артқан сайын, мышьяқтың қорытпаға жоғары мелшерде етуімен түсіндіріледі.

Шлакты кедейлендіру енімдері арасында металдардың таралуы бойынша алынған заңдылықтар, ғаз фазасына мышьяқтың белінуін арттыру мақсатында жаңа шешімдердің іздестірілуін талап етеді.

### Әдебиеттер

1 *Sobanska, S., Ledesert, B., Deneele, D., Laboudigue, A.*, Alteration in soils of slag particles resulting from lead smelting // *Comptes Rendus de l'Academie des Science de Paris, Earth and Planetary Sciences.* – 2000. – Vol. 331. – P. 271-278,.

2 *Ettler, V., Mihaljevic, M., Touray, J.C., Piantone, P.*, Leaching of polished sections: an integrated approach for studying the liberation of heavy metals from lead-zinc metallurgical slags // *Bulletin de la Societe Geologique de France.* – 2002, 173(2). – P.161-169.

3 *Barna, R., Moszkowicz, P., Gervais, C.*, Leaching assessment of road materials containing primary lead and zinc slags // *Waste Management.* – 2004, 24. – P. 945-955.

4 *Ettler, V., Piantone, P., Touray, J.C.*, Mineralogical control on inorganic contaminant mobility in leachate from lead-zinc metallurgical slag: experimental approach and long-term assessment // *Mineralogical Magazine.* – 2003, 67(6). – P. 1269-1283.

5 *Ettler, V., Komarkova, M., Jehlicka, J., Coufal, P., Hradil, D., Machovic, V., Delorme, F.*, Leaching of lead metallurgical slag in citric solutions – implications for disposal and weathering in soil environments // *Chemosphere.* – 2004, 57. – P. 567-577.

6 *Goraj, B., Jana, R.K.* Characteristics and utilisation of copper slag – a review *Resources // Conservation and Recycling.* – 2003, 39. – P. 299-313.

7 *Moskalyk R.R., Alfantazi A.M.* Review of copper pyrometallurgical practice: today and tomorrow // *Minerals Engineering.* – 2003. – V.16. – P.893–919.

8 *Nagamori M.* Metal loss to slag: Part I. Sulfidic and oxidic dissolution of copper in fayalite slag from low grade matte // *Metallurgical Transactions.* – 1974. – V.5. – P.531-538.

9 *Русаков М.Р.* Процессы высокоинтенсивной электроплавки и высокоинтенсивного обеднения шлаков // *Новые процессы в металлургии никеля, меди и кобальта. Теория и практика. Труды Института Гипроникель.* – М.: Изд. Дом «Руда и металлы». – 2000. – С.126-138.

10 Нус Г.С. Обеднительная шлаковая электропечь – технологическое долголетие // Цветные металлы. – 2009. – № 2. – С.59-61.

11 Norbert L. Piret. Cleaning copper and Ni/Co slags: The technical, economic, and environmental aspects // JOM. – 2000. – V. 8. – P.18-20.

12 Hughes S. Applying ausmelt technology to recover Cu, Ni, and Co from slags // JOM. – 2007. – V.52. – P.30-33.

13 Demetrio S., Ahumada J., Duran M.A., Mast E. Slag cleaning: The Chilean copper smelter experience // JOM. – 2000. – V.8. – P.20-25.

14 Досмухамедов Н.К., Жолдасбай Е.Е., Нурлан Г.Б. Термодинамические закономерности восстановления высокомедистых шлаков углем // Новости науки Казахстана. 2019, № 1, – С. 125-130

**Жолдасбай Е.Е.** - магистр технических наук, e-mail: zhte@mail.ru

**Досмухамедов Н.К.** - кандидат технических наук, ассоциированный профессор, e-mail: nurdos@bk.ru