

УДК 669.04-027.1

МРНТИ 53.07.05

<https://doi.org/10.31643/2019/6445.06>ДИХАНБАЕВ Б. И.<sup>1\*</sup>, ДИХАНБАЕВ А. Б.<sup>2</sup><sup>1</sup>Казахский Агротехнический Университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан,\*e-mail: [otrar\\_kz@mail.ru](mailto:otrar_kz@mail.ru)<sup>2</sup>Алматинский Университет Энергетики и Связи, Алматы, Казахстан

## РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ СОВМЕСТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СУЛЬФИДНЫХ СВИНЦОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ И ОТВАЛЬНЫХ ШЛАКОВ МЕТОДОМ ПРЕДЕЛЬНОГО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

*Ссылка на данную статью:* Диханбаев Б.И., Диханбаев А.Б. Разработка тепловой схемы совместной переработки сульфидных свинцовых концентратов и отвальных шлаков методом предельного энергосбережения. // Комплексное использование минерального сырья. – 2019. – №1. – С. 51-61. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.06>

Received: 11 December 2018 / Peer reviewed: 28 January 2019 / Accepted: 04 February 2019

**Резюме.** Наряду с достоинствами, современные процессы прямой плавки свинцового сырья имеют ряд недостатков: тепловые и материальные потери со шлаком фьюмингования; производство серной кислоты невысокого качества; двухкратное увеличение удельного расхода топлива при производстве металлов из тугоплавких цинк-, железосодержащих отходов, по сравнению с их выработкой из «богатых» рудных материалов. В статье представлена разработка энергосберегающей тепловой схемы безотходной переработки сульфидных свинцовых концентратов совместно с отвальными цинксодержащими шлаками, которая по удельному расходу топлива будет в несколько раз ниже, чем на действующих аналогах. В качестве научно-обоснованного способа поиска принята методология предельного энергосбережения. Следуя основным принципам методологии предельного энергосбережения, последовательно были проведены эксперименты: по определению времени перемешивания расплава на газожидкостной модели плавильного реактора, и по возгонке цинка, германия и восстановлению железа из жидких шлаков фьюмингования Чимкентского свинцового завода, а также совместно с отвальными шлаками Усть-Каменогорского свинцово-цинкового комбината на пилотной установке производительностью 1,5 т/ч. Результаты экспериментальных исследований обрабатывались методами планирования экспериментов и аффинного моделирования. В результате поиска найден новый способ обработки расплава - «слой расплава с инверсией фаз», на его базе создан агрегат «реактор инверсии фаз – трубчатая печь». Показано, что переработка шлаков на пилотной установке, по удельной производительности в 3-4 раза выше, а по удельному расходу топлива в 2-3 раза ниже, чем на действующих вельч-печах. Разработана принципиальная схема технологии безотходной переработки сульфидного свинцового концентрата совместно с отвальными шлаками; на основе созданного агрегата и технологии сформирована тепловая схема новой системы производства первичного свинца. Расчеты тепловой схемы показывают, что в новой системе удельный расход топлива снизится в 3,5-4 раза по сравнению с процессом «окислительный агломерирующий обжиг – восстановительная шахтная плавка – фьюмингование».

**Ключевые слова:** сульфидный свинцовый концентрат, реактор инверсии фаз – трубчатая печь, медистый чугун, цинк-германий содержащие возгоны, искусственный газ, энергосбережение

### Information about authors:

**Dikhanbaev Bayandy** - Doctor of Technical Sciences, Acting Associate Professor of the Department "Thermal Power Engineering", Kazakh Agrotechnical University named after S.Seifullin, e-mail [otrar\\_kz@mail.ru](mailto:otrar_kz@mail.ru)

**Arystan Bayandyevich Dihanbaev** - PhD student of the department "Thermal Power Engineering", Almaty Power and Communication University, e-mail [arvstan.d74@gmail.com](mailto:arvstan.d74@gmail.com)

ДИХАНБАЕВ Б. И.<sup>1\*</sup>, ДИХАНБАЕВ А. Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Астана, Қазақстан, \*e-mail: [otrar\\_kz@mail.ru](mailto:otrar_kz@mail.ru)<sup>2</sup>Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

## ШЕКТІ ҚУАТ ҮНЕМДЕУ ӘДІСІ АРҚЫЛЫ СУЛЬФИДТІК ҚОРҒАСЫНДЫ КОНЦЕНТРАТТАР МЕН БІРГЕ ҮЙІНДІ ҚОЖДАРДЫ ҚАЙТА ӨНДЕУДІҢ ЖЫЛУ КЕСТЕСІН ӘЗІРЛЕУ

**Түйіндеме.** Артықшылығымен қатар, қорғасын шикізатын тікелей балқытудың қазіргі заманғы процестерінде келесі кемшіліктер бар: фьюминг қожымен бірге жылу және материалдық шығындар; сапасы жоғары емес күкірт қышқылын өндіру; "бай" кен материалдарынан металл өндірумен салыстырғанда, қиын балкитын құрамында мырыш, темір бар қалдықтардан металл өндіру кезінде отынның меншікті шығынының екі есе ұлғаюы. Жұмыстың мақсаты құрамында мырыш бар үйінді қождармен бірге сульфидті қорғасын концентраттарын қалдықсыз өндеудің энергия үнемдейтін жылу схемасын әзірлеу болып табылады. Ол отынның меншікті шығыны бойынша қолданыстағы аналогтарға қарағанда бірнеше

есе төмен болады. Издестірудің ғылыми-негізделген тәсілі ретінде шекті энергия үнемдеу әдіснамасы қабылданды. Осындай әдіснаманың негізгі принциптеріне сүйене отырып, өнімділігі 1,5 т/сағ пилоттық қондырғыда келесі: балқыту реакторының газ - сұйықтық моделінде балқыманы араластыру уақытын анықталды; мырыш, германийды газға айдау және Чимкент қорғасын зауытының фьюмингілеу сұйық шлактарынан, Өскемен қорғасын-мырыш комбинатының үйінді аралас шлактарынан темірді қалпына келтіру бойынша эксперименттер жүргізілді. Зерттеулердің нәтижелері эксперименттерді жоспарлау және аффинды үлгілеу әдістерімен пысықталды. Издеу нәтижесінде балқыманы өңдеудің жаңа тәсілі - "инверсиялы фаза балқыма қабаты" табылып, оның негізінде "инверсиялы фаза реакторы – құбырлы пеш" агрегаты құрылды. Шлактарды пилоттық қондырғыда өңдеу вельц-пештерге қарағанда үлестік өнімділігі бойынша 3-4 есе жоғары, отынның үлестік шығыны бойынша 2-3 есе төмен екендігі көрсетілді. Сульфидті қорғасын концентратын үйінді қождармен бірге қалдықсыз өңдеу технологиясы әзірленді; құрылған агрегат және технология негізінде қорғасын өндірісінің жаңа жүйесінің жылу схемасы қалыптастырылды. Жылу сұлбасын есептеу жаңа жүйеде отынның меншікті шығыны "тотықтырғыш агломерациялау күйдіру-қалпына келтіргіш шахталық балқыту – фьюмингілеу" процесімен салыстырғанда 3,5 – 4 есеге төмендегенін көрсетеді.

**Түйін сөздер:** сульфидті қорғасын концентраты, инверсиялы фаза реакторы-құбырлы пеш, мысты шойын, мырыш-германий ұшырындылары, жасанды газ, энергия үнемдеу

DIHANBAEV B. I.<sup>1\*</sup>, DIKHANBAEV A. B.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazakh Agrotechnical University named after S.Seifullin, Astana, Kazakhstan, \* e-mail: [otrar\\_kz@mail.ru](mailto:otrar_kz@mail.ru)

<sup>2</sup>Almata University of Energy and Communications, Almaty, Kazakhstan

## THE DEVELOPMENT OF THE THERMAL SCHEMES JOINT PROCESSING OF SULPHIDE OF LEAD CONCENTRATES, AND WASTE SLAGS BY THE METHOD OF EXTREME POWER SAVING

**Abstract.** Along the advantages, modern processes of direct smelting of lead raw materials have a number of disadvantages: heat and material losses with fuming slag; low quality sulfuric acid production; a twofold increase in the specific fuel consumption in the production of metals from refractory zinc, iron-containing wastes, compared to their extraction from "rich" raw materials. The aim of the work is to develop an energy-saving thermal scheme of waste-free processing of lead sulphide concentrates together with waste zinc-containing slag, which will be several times lower in specific fuel consumption than on existing analogues. The methodology of extreme energy saving (MEES) has been adopted as a scientifically justified search method. Following the basic principles of the MEES, experiments were successively carried out: (1) on determine a time of melt mixing in the gas-liquid model of the smelting reactor, (2) on sublimate zinc, germanium and reduce iron from liquid slag of the Chymkent lead plant (ChLP), excavated slag of Ust-Kamenogorsk lead-zinc plant and ChLP on a pilot plant with a capacity of 1.5 t / h. The results of experimental studies were processed by the methods of planning experiments and affine modeling. As a result of the search, a new method for treating the melt, the "smelt layer with inversion phase", was found, on its base an aggregate "reactor inversion phase — rotary kiln" was created. It is shown that slag recycling at the pilot plant is 3-4 times higher in specific productivity, and 2-3 times lower in specific fuel consumption than in operating waelz-kiln. Technology of waste-free processing of lead sulfide concentrate together with waste slag has been developed; on the basis of the created unit and technology, the thermal scheme of the new system for the production of primary lead has been formed. Calculations of the thermal scheme show that in the new system the specific fuel consumption will decrease by 3.5-4 times in comparison to the process "oxidative agglomeration roasting - reduction shaft smelting - fuming".

**Keywords:** sulphide lead concentrate, reactor inversion phase – rotary kiln, cupreous cast iron, zinc-germanium containing sublimates, artificial gas, energy saving

**Введение.** Большая часть первичного свинца в мире производится традиционным пирометаллургическим способом: «окислительный агломерирующий обжиг – восстановительная шахтная плавка – фьюмингование». В связи с обострением энергетического кризиса и экологической ситуации появляются новые, энергетически более эффективные и экологически более чистые процессы прямой плавки свинцового сырья.

В мире в настоящее время промышленно используется несколько таких процессов: Kaldo (Швеция), Queneau-Schuhmann-Lurgi (QSL, Германия), Top Submerged Lance (TSL Австралия), кислородно-взвешенная электротермическая плавка (КИБЦЭТ, Казахстан), Shui Koushan Smelting, (SKS, Китай) и еще один, недавно разработанный и освоенный в Китае процесс в жидкой ванне с боковым дутьем (прототипом которого является

хорошо известный в Казахстане процесс Ванюкова). Доля процессов прямой плавки первичного свинцового сырья к настоящему времени выросла до 60 % [1-6].

Однако, наряду с неоспоримыми достоинствами все перечисленные процессы прямой плавки имеют следующие общие недостатки: загрузка холодного основного и флюсового материала в слой расплава без предварительной тепловой обработки, что потребует двукратного расхода топлива на нагрев и плавление по сравнению с регенеративным нагревом исходного материала отходящими из плавильной зоны газами; огромные тепловые потери с огненно-жидким расплавом фьюмингования на стадии водяного «тушения» и загрязнение окружающей среды парогазовой смесью процесса грануляции шлаков; образование локальных взрывов, связанных с попаданием

штейна в грануляционный бассейн; использование периодического режима и традиционного барботажного способа фьюмингования расплава; образование шлаковых отвалов содержащих до, %: 2 цинка, 1 меди, 30 железа и 60 силикатной части шлака; водо- и энергозатратное производство серной кислоты невысокого качества, сбыт которой требует дополнительных затрат для ее очистки. На некоторых заводах сернистые газы нейтрализуют суспензией гидроксида кальция. Однако, получение такого раствора требует предварительных затрат, как добыча известняка, транспортировка, дробление, обжиг известняка и потери тепла на стадии экзотермической реакции тушения извести. В результате получается еще один вид отхода – сульфит кальция  $\text{CaSO}_3$ . Даже, если предположить, что сразу можно получить кондиционный продукт  $\text{CaSO}_4$ , то этот продукт не может конкурировать на рынке с природным гипсом.

Еще одной проблемой для современных процессов является переработка тугоплавких цинк-, железосодержащих отходов, шлаков фьюмингования, клинкера вельцевания, кеков цинкового производства, количество которых непрерывно растет. Например, в QSL-процессе, рост концентрации тугоплавких компонентов требует повышения температуры барботируемой ванны, что может сместить процесс выплавки свинца в стадию его возгонки и увеличить отгонку сульфида свинца в отходящие газы. В случае с КИВЦЭТ-процессом, повышение содержания тугоплавких соединений увеличивает риск замораживания расплава на «коксовом фильтре», что потребует повышения температуры факела, что связано также с увеличением отгонки соединений свинца в отходящие газы. Снижение концентрации свинца в исходном сырье подобным же образом влияет на эффективность производства свинца [2].

Использование в конструкции КИВЦЭТ-печи большого количества водоохлаждаемых медных элементов, на проточно-водяном охлаждении, также делает процесс дорогостоящим. Например, во фьюминг-печи шлаковозгоночной установки бывшего Чимкентского свинцового завода применялись более дешевые, но надежные стальные трубчатые кессоны с испарительным охлаждением, с гарнисажной футеровкой, сроком службы 3-5 лет. Плотность теплового потока через стенки труб примерно одинакова с медными элементами КИВЦЭТ-процесса, 140-145 кВт/м<sup>2</sup>.

Массовое внедрение процессов прямой плавки сопровождается планомерным истощением запасов высокосортных и легкообогатимых свинцовых, свинцово-цинковых и

полиметаллических (свинцово-медно-цинковых) руд, увеличением доли низкосортных свинец-, цинк- и медьсодержащих промпродуктов цинкового и медного производств (кеки, шламы, пыли) в сырье свинцового производства по отношению к свинцовым концентратам. Согласно [7-9], разведанных запасов «богатых» полиметаллических руд Республики Казахстан, достаточно только на 30-35 лет. К настоящему времени в отвалах предприятий РК накоплено около 20 миллиардов техногенных отходов, из них 10,1 млрд. т – цветной металлургии и 8,7 млрд. т – черной металлургии. Концентрации ценных компонентов в них не ниже чем в низко потенциальном минеральном сырье. Ежегодно образуется до 700 миллионов тонн техногенных отходов.

После исчерпания «богатых» запасов руд предприятия РК могут остаться с низкопотенциальным минеральным сырьем и техногенными отходами индустрии. Так как техногенные отходы лежат на поверхности, их переработка была бы предпочтительнее чем обработка низко потенциального минерального сырья, лежащего под поверхностью земли. Однако, при производстве металлов из техногенных отходов, равно как и из низко потенциального минерального сырья, при использовании современных технологий удельная затрата энергии возрастет до 2-х раз по сравнению с их выработкой из «богатых» руд [10].

Неуклонное сокращение доли «богатого» минерального сырья в сочетании с резким подорожанием энергоресурсов и низкими ценами на металлы приводит к падению рентабельности производства. Ярким примером может служить Чимкентский свинцовый завод, работавший по традиционной технологии «окислительный агломерирующий обжиг – восстановительная шахтная плавка – фьюмингование». Истощение «богатых» запасов Миргалимсайского, Ачисайского свинцово-цинковых руд, отсутствие рудной базы, модернизации, резкий скачок цен на энергоресурсы привели к полной остановке, а затем к исчезновению завода, ежегодно производившего ~140000 тонн рафинированного свинца и сопутствующих металлов (рисунк1).

Последнее обстоятельство стимулирует исследователей к поиску конкретных способов и технических средств для разработки безотходных теплотехнологических систем, позволяющих многократно сократить удельный расход энергии и уменьшить себестоимость продукции пропорционально.



а)



б)

Рисунок 1 - Чимкентский свинцовый завод  
а)-прежде, б)-сейчас

*Цель и методы исследования.* В качестве научно-обоснованного способа исследования, позволяющего создать безотходную, экологически совершенную и рентабельную систему переработки свинцового сырья принята методология предельного энергосбережения (МПЭ) [11]. Задачами МПЭ являются:

1) формирование безотходной технологии: позволяющей перерабатывать сульфидный концентрат с низким содержанием свинца и отвальные шлаки свинцового производства; устраняющей возгонку соединений свинца из концентрата при подъеме температуры процесса; заменяющей процесс производства серной кислоты на «складируемые» серосодержащие продукты, необходимые на рынке;

2) разработка энергосберегающего способа обработки сырья в расплаве с: ~3-х разовым сокращением удельного расхода топлива по сравнению со стандартной технологией производства свинца; созданием на его основе плавильного агрегата на испарительном охлаждении и регенеративным подогревом исходного сырья отходящими газами из плавильной камеры;

3) разработка тепловой схемы на базе безотходной технологии и энергосберегающего оборудования.

Результаты экспериментальных исследований на пилотной установке обрабатывались методом планирования экспериментов. Пересчет тепло-технологических и конструктивных характеристик пилотной установки на промышленный образец производился методом аффинного моделирования.

*Разработка безотходной технологии.* Для разработки безотходной технологии переработки сульфидного свинцового концентрата в качестве основных процессов выбраны следующие:

а) восстановление железа и возгонка цинка из отвальных шлаков;

б) выработка из силикатной части исходного шлака, расплава, пригодного для производства строительных материалов;

в) вытеснение свинца, меди и возгонка цинка из их сульфидов металлическим железом в непродуваемой газовой ванне, основанные на реакциях:  $PbS + Fe = Pb + FeS$ ;  $CuS + Fe = Cu + FeS$ ;  $ZnS + Fe = Zn + FeS$ ;

г) нейтрализация  $SO_2$  - содержащих газов водной суспензией цинковых возгонов, вырабатываемых в системе:



Подбор порядка проведения процессов в технологии осуществлялся в соответствии со значениями коэффициентов соотношений констант равновесия (K) реакций восстановления металлов относительно железа – А, В и С [12].

$$A = \frac{K(CuO + CO = Cu + CO_2) \cdot 7,359E+003}{K(FeO + CO = Fe + CO_2) \cdot 2,877E-001} = 25578 \quad (1)$$

$$B = \frac{K(PbO + CO = Pb + CO_2) \cdot 1,623E+002}{K(FeO + CO = Fe + CO_2) \cdot 2,877E-001} = 564 \quad (2)$$

$$C = \frac{K(ZnO + CO = Zn + CO_2) \cdot 1,980E+000}{K(FeO + CO = Fe + CO_2) \cdot 2,877E-001} = 6,88 \quad (3)$$

Согласно (1-3), для температуры процессов 1400 °С, медь и свинец являются легко восстанавливаемыми, а цинк и железо трудно восстанавливаемыми компонентами сырья, соответственно требующими слабо перемешиваемых и интенсивных методов обработки.

Таким образом, согласно (1-3), восстановление металлов целесообразно вести в последовательности (железо, цинк) – (свинец, медь). Тогда, высокопотенциальные газы после восстановления железа можно было бы использовать регенеративно, внутри системы, для

нагрева и плавки шлака, проведения осадительной плавки чернового свинца и термической обработки строительных материалов, производимых из силикатного расплава.

Создание энергосберегающего плавильного агрегата и результаты экспериментов. Оборудование и материалы. С целью поиска энергосберегающих методов извлечения цинка из

расплава построена пилотная установка для переработки отвальных шлаков производительностью 1,5 т/ч [13, 14]. Проект финансировался РГП «Национальный Центр по Комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан» и Британской компанией «Zinc OX». Общий вид и структурная схема установки показаны на рисунках 2 и 3.

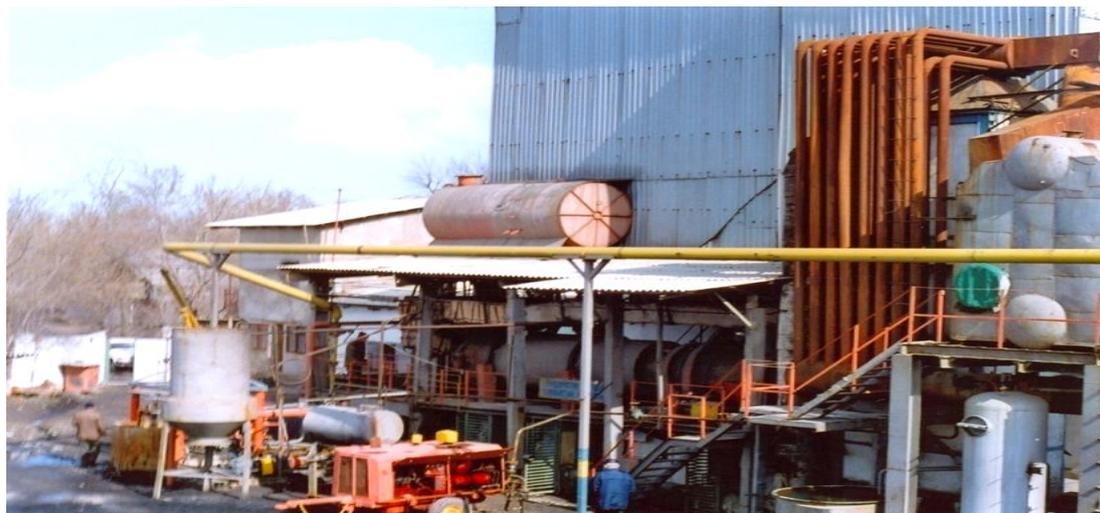
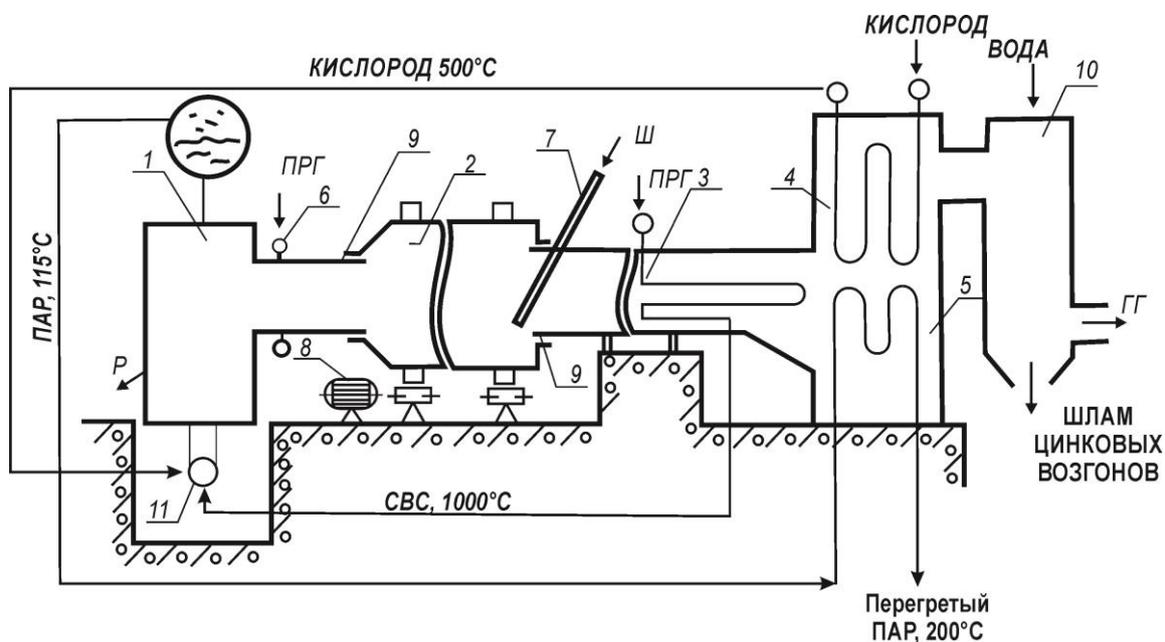


Рисунок 2 – Общий вид пилотной установки



1 – плавильный реактор с барабан-сепаратором, 2 – вращающаяся часть печи, 3 – неподвижная часть печи с теплообменником, для пиролиза природного газа, 4 – воздухоподогреватель, 5- пароперегреватель, 6 – коллектор ввода дополнительного природного газа, 7 – шлакозагрузочная труба, 8 – привод трубчатой печи, 9- уплотнение зазоров вращающейся части печи, 10 – эжекторный скруббер, 11 – топка, ПРГ – природный газ, СВС – сажеводородистая смесь, ГГ – горючий газ, Ш – шлак, Р – расплав.

Рисунок 3– Структурная схема пилотной установки

Установка состоит из следующих узлов: плавильный реактор (ПР) с гарнисажными кессонами, водоохлаждаемой поверхностью 10 м<sup>2</sup>; вращающаяся печь длиной 4 м, неподвижная трубчатая печь длиной 4,5 м и воздухоподогреватель (ВЗП) с поверхностью нагрева 200 м<sup>2</sup>; система, включающая два нагнетателя воздуха V=80 м<sup>3</sup>/мин, P=1,8 атм, два дымососа, эжекторный скруббер; узел химической водоочистки, газорегуляторный узел и трансформаторная подстанция; два бункера для шлаков вместимостью 15 тонн, каждый; бассейн для грануляции расплава с механизмом для удаления шлака; система водоснабжения с двумя градирнями. Установка находится в г. Шымкент.

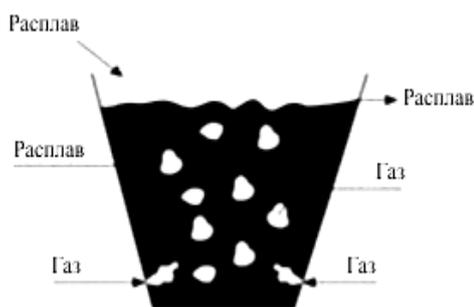
Принцип действия установки с непрерывным режимом представлен рисунке 3. Шлак с бункеров через трубу 7 загружается во вращающуюся печь (ВП), где нагревается высокотемпературными газами ПР до 900 °С, затем с помощью устройства непрерывной загрузки инжектируется в ПР. В плавильном реакторе шлак расплавляется, из него восстанавливается медь и железо в жидкую фазу, возгоняются цинк и редкие металлы в газовую фазу. Шлакометаллический расплав из реактора, содержащий медистый чугун, гранулируется водой в бассейне или подается в отстойник. Горючие газы ПР, частично восстанавливают цинк и железо из оксидов в ВП, затем разогревают и разлагают природный газ в теплообменнике 3 на сажеводородистую смесь (~1000 °С). Горючие газы после теплообменника 3 подаются в скруббер, для охлаждения и сепарации возгонов цинка от газов. Охлажденные горючие газы после скруббера могут использоваться на другие технологические нужды, например, для транспортировки раскаленного шлака из печи в реактор, динамической герметизации стыков реактора и печи, и как топливо для термической обработки каменного литья или шлаковаты.

Опыты проводились на отвальных шлаках следующего химического состава, %: ZnO (3,5-10); PbO (0,1 – 1,15); Cu (0,6 – 1,0); FeO (7 - 8); Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2 - 3); Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (23 - 24); SiO<sub>2</sub> (27 - 28); CaO (13 - 14); Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7 - 9); S (0,4 – 0,5).

Общее количество переработанного на пилотной установке «бедного» по цинку (3,8-4,3 %) шлака составило ~250 т, «богатого» (9-10 %) ~150 т.

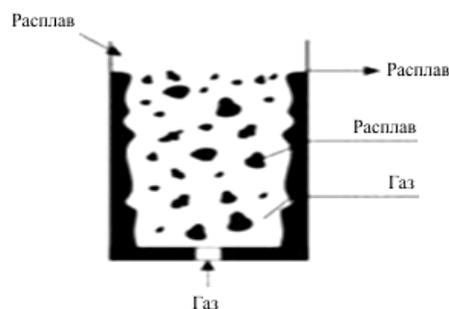
*Результаты экспериментов.* Были проведены эксперименты с применением традиционного способа – барботажного слоя

расплава и нового способа обработки шлаков – кипящего слоя расплава в непрерывном режиме (рисунки 4 и 5) [15,16].



Применяется во фьюминг-печи, Корекс-печи, печи Ванюкова, Аусмелт, Айзасмелт и др.

Рисунок 4 – Барботажный слой расплава



Применяется в опытных прямоточно-вихревой плавильной камере и реакторе кипящего слоя расплава и др.

Рисунок 5 – Кипящий слой расплава

В отличие от барботажного режима (рисунок 4), где структура слоя имеет вид «жидкость–сплошной, газ–дискретный», режим кипящего слоя расплава (рисунок 5), по аналогии с кипящим слоем псевдооживленных твердых частиц, характеризуется состоянием «газ–сплошной, жидкость–дискретный», с постоянной локализацией сплошной газовой фазы и дискретной жидкой фазы, без какой-либо их инверсии. Кипящий слой расплава по определению относится к режиму приближенного к идеальному смешению.

В результате экспериментов получены следующие данные:

– режим в условиях барботажного слоя расплава,

$$(I_c/G_v=0,0577)<0,09; \quad E=28-30 \% \quad (4)$$

– режим в условиях кипящего слоя расплава,

$$0,09<(I_c/G_v=0,185)<0,19; \quad E=36-40 \% \quad (5)$$

где  $I_c/G_v$  – отношение газового импульса через сопла продувочной решетки,  $кг \cdot м/с^2$ , к весу ванны расплава над решеткой,  $кг \cdot м/с^2$ ;  $I_c = m_g \cdot W_c$  – газовый импульс (скорость изменения количества движения) в соплах продувочной решетки реактора,  $m_g$  – массовый расход газов в соплах;  $W_c$  – скорость газов в соплах решетки;  $G_v = M_v \cdot g$  – вес ванны (слоя);  $M_v$  – масса ванны;  $g$  – ускорение свободного падения;  $E$  – степень извлечения цинка из шлака.

Таким образом, несмотря на плавильную способность барботажного и кипящего слоев расплава, позволяющую получать гомогенный расплав, восстановительная способность рассмотренных способов, при выпуске расплава с вертикального и наклонного кессонов, оказалась неудовлетворительной:  $E=28-30\%$  и  $E=36-40\%$  [15].

В результате дальнейшего поиска найдена новая область взаимодействия системы «газ-жидкость», названная нами «слой расплава с инверсией фаз», принципиально отличающаяся по структуре слоя и достигаемому результату от традиционного, барботажного и нового, кипящего слоев расплава, (рисунки 6 и 7).

Слой расплава с инверсией фаз (СИФ) образуется при струйном истечении газа в стационарный слой расплава с образованием газожидкостной эмульсии, где дискретная газовая фаза в сплошном расплаве находится в виде пузырьков; при расширении газа в свободном объеме, вовлекаемая жидкая фаза переходит в дискретное, а газовая – в сплошное состояние; при обратно-вертикальной атаке газокапельного потока наклонно вытесняемой поверхности расплава, жидкая фаза опять становится сплошной (рисунок 6). Эффективность восстановления цинка возрастает в пределах зоны покрытия газокапельного потока наклонной поверхности расплава, вытесняемого в направлении к летке. В отличие от барботажного и кипящего слоев расплава, где масса ванны не зависит от производительности слоя по шлаку, в СИФ при изменении производительности слоя масса ванны меняется по прямолинейному закону; последнее обстоятельство характеризует СИФ как сочетание режимов идеального смешения и идеального вытеснения.

В результате проведенных экспериментов в режиме слоя расплава с инверсией фаз,  $(I_c/G_v=0,42) > 0,19$ , с выпуском расплава с вертикального кессона (на рисунке 7 – боковая летка), степень извлечения цинка оставалась

постоянной,  $E=36-40\%$ . При выпуске с наклонного кессона, в режиме СИФ,  $(I_c/G_v=0,42) > 0,19$ , (на рисунке 7 – фронтальная летка), степень извлечения цинка повысилась и составила  $E=68-70\%$  [15].

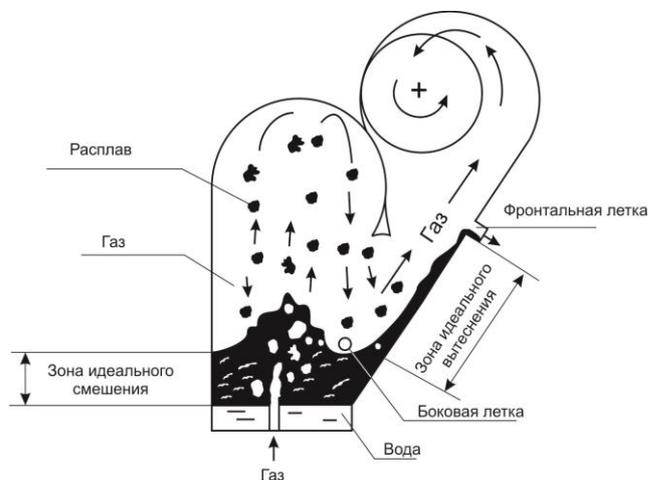


Рисунок 6 – Принципиальная схема слоя расплава с инверсией фаз

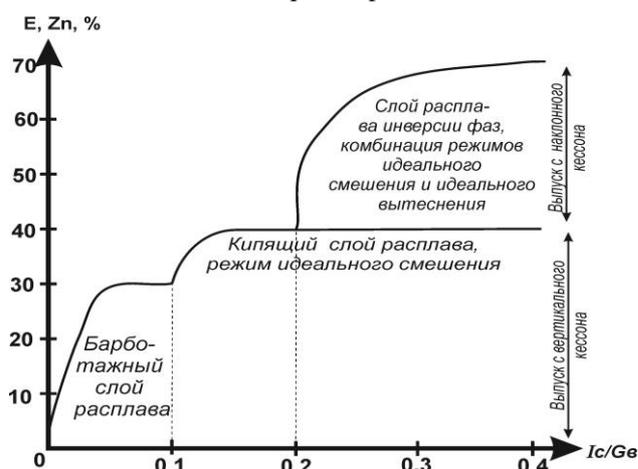


Рисунок 7 – Качественный график изменения степени возгонки цинка от способа и режима обработки шлака в плавильном реакторе

На пилотной установке также были проведены эксперименты по восстановлению железа из шлаков [16]. Полученная продукция: цинк в возгонах – 90 кг/ч; углеродсодержащий железомедный сплав (медистый чугун) – 200 кг/ч; силикатный расплав пригодный для камелитья – 600-700 кг/ч; горючий газ с низшей теплотой сгорания 7100-7200 кДж/м<sup>3</sup> и жаропродуктивностью 1600-1700 °С.

При обработке SO<sub>2</sub>-газов водной суспензией оксида цинка получается устойчивый до 300 °С сульфит цинка ZnSO<sub>3</sub>, который при окислении кислородом при PH>7 переходит в раствор в виде ZnSO<sub>4</sub>. Последний

используется для электролиза цинка. Состав продуктов нейтрализации  $\text{SO}_2$ -газов возгонами цинка следующий, %: 65-70  $\text{ZnSO}_3 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ ; 4-5  $\text{ZnSO}_4 \cdot 3\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ; 3-4  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ; 2-3  $\text{PbSO}_3$ ; 1-2  $\text{PbSO}_4$ ; 5-6  $\text{SiO}_2$  [17].

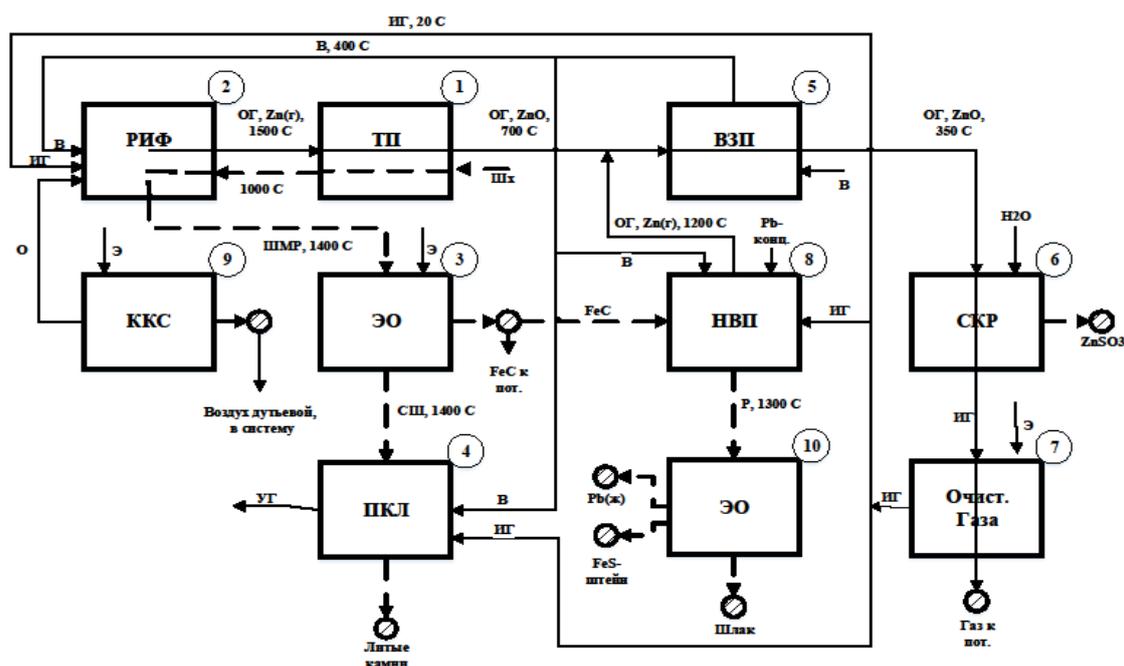
В работе [18] произведен пересчет технологических и конструктивных характеристик пилотной установки производительностью 1,5 т/ч на промышленный образец производительностью 31 т/ч, методом аффинного моделирования. Показано, что в сопоставимых условиях переработка шлаков на установке на базе плавильного реактора инверсии фаз, по удельной производительности будет в 3-4 раза выше, а по удельному расходу топлива – в 2-3 раза ниже, чем на действующих вельц-печах, перерабатывающих шлаки идентичного состава.

**Разработка энергосберегающей тепловой схемы безотходной переработки свинцовых концентратов и отвальных шлаков.** На базе сформированной технологии прямого получения черного свинца и энергосберегающего плавильного реактора инверсии фаз, разработана тепловая схема новой системы совместной переработки сульфидных концентратов и отвальных шлаков.

Принцип действия предлагаемой системы с непрерывным режимом представлен на рисунке 8. Шихта, состоящая из отвальных цинксодержащих шлаков, экибастузского угля и негашеной извести загружается в трубчатую печь (1), нагревается до 900-1000 °С отходящими высокотемпературными восстановительными газами (далее искусственный газ) реактора инверсии фаз (2). В трубчатой печи (1) также происходит частичное восстановление цинка и железа из оксидов и частичная газификация угля. Затем шихта загружается в реактор инверсии фаз (2), где в атмосфере неполного горения происходит перегрев, плавление шихты, полная газификация угля и регламентированное восстановление железа из его оксидов в виде медьсодержащего чугуна. Получаемый шлако-металлический расплав направляется в электроотстойник (3) для разделения медистого чугуна от силикатного шлака. Последний используется в (4) для производства строительных материалов, таких как камнелитые изделия, шлаковата или цементный клинкер невысокого качества. Искусственный газ из реактора инверсии фаз (2) последовательно охлаждается в трубчатой печи (1), воздухоподогревателе (5), скруббере (6) и,

после осушки и очистки от примесей в камере (7), используется как топливо в плавильном реакторе (2); для термической обработки камнелитых изделий в камере (4); для отопления наклонной вращающейся печи осадительной плавки свинца (8). Излишки газа используются для бытовых нужд системы. В компрессорно-кислородной станции (9) производится технологический кислород для восстановления железа в реакторе (2) и сжатый воздух для воздухоподогревателя (5). Медьсодержащий чугун из электроотстойника (3) заливается в наклонную вращающуюся печь (8). Сюда же загружается окатыши сульфидного свинцового концентрата и производится отражательная, осадительная плавка свинца из концентрата в массе железа медистого чугуна. Топливом служит искусственный газ из камеры (7), а окислителем – нагретый в (5) воздух. Отходящие газы из наклонной вращающейся печи (8), содержащие газообразный цинк, сернистый ангидрид смешиваются с газами трубчатой печи (1) и подводятся к воздухоподогревателю (5). Расплав, продукт осадительной плавки из (8), направляется в электроотстойник (10), для ликвационного разделения черного свинца от железосодержащего штейна и шлака. Материал штейна,  $\text{FeS}$ , может быть использован для обработки различных загрязнителей в подпочвенной воде, таких как мышьяк, уран и хром [19], для производства керамики, полупроводниковой техники, фотоприемников и инфракрасных детекторов [20]. Отходящие искусственные газы с воздухоподогревателя (5), содержащие сернистый ангидрид и цинковые возгоны промываются в скруббере (6) с образованием водной эмульсии цинковых возгонов и выделением из жидкости твердого сульфата цинка  $\text{ZnSO}_3$ .

В предлагаемой системе в качестве топлива принят экибастузский уголь, миллиардные запасы которого имеются в стране и, содержащий в своем составе до 200 г/т галлия, германия, до 4 % цинка и до 1 г/т золота [21]. В системе, кроме шлаков, также можно перерабатывать клинкер вельцевания и кеки выщелачивания огарков, количество которых непрерывно растет. С учетом значительного роста в последнее время цен на свинец и цинк, соответственно увеличилась и стоимость произведенной из шлаков продукции, и поэтому можно полагать, что переработка из шлаков строительных материалов может стать экономически выгодной [22].



РИФ – реактор инверсии фаз, ТП – трубчатая (вращающаяся) печь, ВЗП – воздухоподогреватель, ККС – кислородно-компрессорная станция, ЭО – электроотстойник, НВП – наклонная вращающаяся печь для осадительной плавки, Скр – скруббер, ПКЛ – производство каменного литья, Шх – углеродсодержащая шихта, ШМР – шлакометаллический расплав, СШ – силикатный шлак, FeC – медьсодержащий чугуна, (FeS-штейн) – железный штейн, О – технический кислород, В – дутьевой воздух, Э – электроэнергия, ИГ – искусственный газ, ОГ – отходящие газы, УГ – уходящие газы

Рисунок 8 – Энергосберегающая схема системы безотходной переработки сульфидных свинцовых концентратов и отвальных шлаков

Вместе с тем, в новой предлагаемой системе будут вырабатываться дополнительные виды продукции содержащие –  $ZnSO_3$ , железосодержащий штейн, искусственный газ и камнелитые изделия, и приведенная экономия топлива составит 2388 кг у.т./т Pb) [23]. С учетом последнего в новой системе удельный приведенный расход топлива снизится в 3,5-4 раза по сравнению с традиционным процессом производства свинца, использующим способ «окислительный агломерирующий обжиг – восстановительная шахтная плавка – фьюмингование».

**Выводы.** Применение нового способа, слоя расплава инверсии фаз, в сопоставимых условиях переработки шлаков, сократит удельный расход топлива в 2-3 раза по сравнению с действующим вельц-процессом.

Восстановление свинца в небарботируемой ванне методом осаждения свинца из его сульфидов железом резко сократит выход летучих компонентов свинца.

Потребление в системе дешевого экибастузского угля с миллиардным запасом, имеющим в своем составе галлий, германий до

200 г/т, цинк до 4 %, золото до 1 г/т снизит себестоимость продукции.

При совместном восстановлении железа и цинка из металлургических отходов, в виде медьсодержащего чугуна и цинковых возгонов, отпадет необходимость в использовании традиционной, энерго- и материалоемкой установки, «фьюминговая печь – котел – утилизатор».

Использование цинка, продукта системы, как реагента при нейтрализации сернистых газов и железа при осадительной плавке концентрата, позволит исключить из системы энергоемкий процесс производства серной кислоты и производить не коррозионно активную, а «складируемую» продукцию – полупродукт, содержащий сульфит цинка и железный штейн.

Производство строительных материалов из силикатного расплава, камнелитых изделий, шлаковаты или цементного клинкера невысокого качества позволит снизить себестоимость продукции.

В предлагаемой системе «реактор инверсии фаз – трубчатая печь – наклонная вращающаяся печь» удельный приведенный расход топлива снизится в 3,5-4 раза по

сравнению с традиционным процессом производства свинца, использующим способ «окислительный агломерирующий обжиг – восстановительная шахтная плавка – фьюмингование».

Вовлечение в процесс отвальных шлаков, кеков выщелачивания огарков, клинкера вельцевания позволит расширить сырьевую базу системы и улучшить экологическую обстановку вокруг предприятий.

С учетом значительного роста в последнее время цен на свинец и цинк соответственно увеличится и стоимость продукции, произведенной из шлаков, кеков выщелачивания огарков, клинкера вельцевания, и поэтому можно надеяться, что дополнительное получение из отходов камнелитых изделий, шлаковаты или цементного клинкера невысокого качества может стать экономически выгодным.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Mounsey E.N. A Review of Ausmelt technology for lead smelting. // Proceedings of the Lead-Zinc 2000 Symposium. – Pittsburgh, USA, 2000, – P. 149-169.
- 2 Жарменов А., Ушаков Н., Шумский В. Технология КИВЦЭТ: Создание и реализация // Промышленность Казахстана. –2014. –№4. – С. 40-49.
- 3 Kim M., Lee W.S., Lee Y.H. The QSL Lead Slag Fuming Process Using an Ausmelt Furnace I // Lead-Zinc 2000 Symposium: Proceedings of the Symposium. Pittsburgh, USA, – 2000. – P. 331-343.
- 4 Shumskiy V.A., Ushakov N.N. Lead and Zinc Raw Material Complex Processing I Proceedings of the Lead-Zinc 2010 International Conference.- Vancouver, Canada, 2010. – P. 1049-1055.
- 5 Pullenberg R., Rohkohl A. Modern Lead Smelting at the QSL-Plant Berzelius Metal in Stolberg, Germany I Proceedings of the Lead-Zinc 2000 Symposium. Pittsburgh, USA, –2000. – P. 127-148.
- 6 Шумский В.А. Коммерциализация КИВЦЭТ процесса в Китае // Цветные металлы – 2010: матер. II междунар. конгр. – Красноярск, Россия, 2010, – С. 118-123.
- 7 Болатбаев К. Состояние, проблемы и резервы технологии обогащения полиметаллического сырья. // Промышленность Казахстана. – 2001. – №3. – С.91-93.
- 8 Даукеев С.Ж. Минерально-сырьевые ресурсы Казахстана - возможности научно-технического развития // Вопросы комплексной переработки сырья Казахстана: тр. первой междунар. конф. – Алматы, Казахстан, 2003. – С.11.
- 9 Кошумбаев М.Б. Переработка промышленных и бытовых отходов. Учебное пособие. –Астана, – 2018. – 230 с.
- 10 Hansson R., Holmgren H., Lehner T. Recovery of recycled zinc by slag fuming at the Rönnskär smelter. – JOM, – 2009, – №2 – P. 15-24.
- 11 Ключников А.Д. Высокотемпературная теплотехнология и энергетика теплотехнологии. – М.: Энергия, 2008, – 333 с.
- 12 Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database. Version 5.1. October 31, 2002.
- 13 Диханбаев Б.И., Жарменов А.А., Терликбаев А.Ж., Тельбаев С.А., Романов Г.А., Диханбаев А.Б. Создание пилотной установки по энергосберегающей переработке отвальных шлаков // Минералды шикізатты кешенді ұқсату: Халықаралық ғылыми-тәжірибелік конф. матер. – Қарағанды, Қазақстан, 2008. – Б. 380-384.
- 14 Диханбаев Б.И., Жарменов А.А. Прогнозные характеристики прямого получения свинца из концентратов на базе реактора инверсии фаз // Промышленность Казахстана. – 2010. – № 1(58). – С. 34-35.
- 15 Dikhanbaev B., Dikhanbaev A., Chandima G. Energy-saving method for technogenic waste processing // Journal PLoS ONE 12(12) 2017. – December 27, – P.1-16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187790>
- 16 Dikhanbaev B.I., Dikhanbaev A.B., Ibray S, Rusowicz A. Development of hydrogen-enriched water gas production technology by processing ekibastuz coal with technogenic waste // Archive of mechanical engineering. – 2018. – V. LXV, – N 2. DOI: 10.24425/123022
- 17 Балабеков О.С., Балтабаев Л.Ш. Очистка газов в химической промышленности. – М.: Химия. – 1991. – 251 с.
- 18 Диханбаев Б.И. Интенсивное энергосбережение в переработке минерального сырья. – Астана: КазАТУ. 2018. – 167 с.
- 19 Gong Y., Tang J., Zhao D. Application of iron sulfide particles for groundwater and soil remediation: A review. // Water Res. – 2016– № 3. – P. 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.063>
- 20 Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия. –М.: Высшая школа. –2001. –230 с.
- 21 Абишева З.С., Блайда И.А., Пономарева Е.И. Кислотно-экстракционная технология извлечения галлия из золы-уноса от сжигания энергетических углей // Цветные металлы. – 1994, – № 3. – С. 36-38.
- 22 Диханбаев Б.И., Диханбаев А.Б. Перспективы безотходного сжигания экибастузского угля под котлом тепловых электрических станций // Academic science – problems and achievements: матер. VII междунар. науч.-практ. конф. – North Charleston, USA .– 2015, – V.2. – P. 211-217.
- 23 Диханбаев Б.И., Диханбаев А.Б. Разработка энергосберегающей системы безотходной переработки свинцовых концентратов на базе реактора инверсии фаз // Повышение качества образования и научных исследований: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Экибастуз, Казахстан, 2008. – С. 459-463.

## REFERENCES

- 1 Mounsey E.N. A Review of Ausmelt technology for lead smelting. Proceedings of the Lead-Zinc 2000 Symposium. Pittsburgh, USA, **2000**, 149-169.
- 2 Zharmenov A., Ushakov N., Shumskij V. *Tehnologija KIVCJeT: Sozdanie i realizacija (KIVCET Technology: Creation and Implementation) Promyshlennost' Kazahstana=Industry of Kazakhstan. 2014. 4. 40-49.*
- 3 Kim M., Lee W.S., Lee Y.H. The QSL Lead Slag Fuming Process Using an Ausmelt Furnace I. Lead-Zinc 2000 Symposium: Proceedings of the Symposium. Pittsburgh, USA, **2000**. 331-343.
- 4 Shumskij V.A., Ushakov N.N. Lead and Zinc Raw Material Complex Processing I Proceedings of the Lead-Zinc 2010 International Conference. Vancouver, Canada, **2010**. 1049-1055.
- 5 Pullenberg R., Rohkohl A. Modern Lead Smelting at the QSL-Plant Berzelius Metal in Stolberg, Germany I Proceedings of the Lead-Zinc 2000 Symposium. Pittsburgh, USA, **2000**. 127-148.
- 6 Shumskij V.A. *Kommercializacija KIVCJeT processa v Kitae (Commercialization of KIVCET process in China) Cvetnye metally=Non-ferrous metals. 2010: mater. II Intern. Congr. Krasnoyarsk, Russia, 2010, 118-123.*
- 7 Bolatbaev K. *Sostojanie, problemy i rezervy tehnologii obogashhenija polimetallicheskogo syr'ja. (Status, problems and reserves of the technology of enrichment of polymetallic raw materials) Promyshlennost' Kazahstana=Industry of Kazakhstan. 2001. 3. 91-93.*
- 8 Daukeev S.Zh. *Mineral'no-syr'evye resursy Kazahstana - vozmozhnosti nauchno-tehnicheskogo razvitiya (Mineral resources of Kazakhstan - the possibilities of scientific and technological development). Voprosy kompleksnoj pererabotki syr'ja Kazahstana: tr. pervoj mezhdunar. konf.=Questions of complex processing of raw materials of Kazakhstan: tr. first intern. conf. Almaty, Kazakhstan, 2003. 11.*
- 9 Koshumbaev M. B. *Pererabotka promyshlennyh i bytovyh othodov. (Recycling of industrial and household waste). Uchebnoe posobie= Tutorial. Astana, 2018. 230.*
- 10 Hansson R., Holmgren H., Lehner T. Recovery of recycled zinc by slag fuming at the Rönnskär smelter. *JOM*, **2009**, 2. 15-24.
- 11 Kljuchnikov A.D. *Vysokotemperaturnaja teplotehnologija i jenergetika teplotehnologii. (High-temperature heat technology and power technology heat.) M: Energy, 2008, 333.*
- 12 Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database. Version 5.1. October 31, **2002**.
- 13 Dihanbaev B.I., Zharmenov A.A., Terlikbaev A.Zh., Tel'baev S.A., Romanov G.A., Dihanbaev A.B. *Sozdanie pilotnoj ustanovki po jenergosberegajushhej pererabotke otval'nyh shlakov (Creation of a pilot plant for energy-saving processing of slag dumps). Mineraldy shikizatty keshendi ыqsatu: Halyqaralyq ыlymi-tazhiribelik konf. Mater=Complex processing of mineral raw materials. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Karaganda, Kazakstan, 2008. 380-384.*
- 14 Dihanbaev B.I., Zharmenov A.A. *Prognoznye harakteristiki prjamogo poluchenija svinca iz koncentratov na baze reaktora inversii faz (Predictive characteristics of direct production of lead from concentrates based on the reactor inversion phase) Promyshlennost' Kazahstana=Industry of Kazakhstan. 2010. 1(58). 34-35.*
- 15 Dikhanbaev B., Dikhanbaev A., Chandima G. Energy-saving method for technogenic waste processing. *Journal PLoS ONE* 12(12) **2017**. December 27, 1-16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187790>
- 16 Dikhanbaev B.I., Dikhanbaev A.B., Ibray S, Rusowicz A. Development of hydrogen-enriched water gas production technology by processing ekibastuz coal with technogenic waste. *Archive of mechanical engineering. 2018. V. LXV, 2. DOI: 10.24425/123022*
- 17 Balabekov O.S., Baltabaev L.Sh. *Ochistka gazov v himicheskoy promyshlennosti (Gas cleaning in the chemical industry). M.: Chemistry. 1991. 251.*
- 18 Dihanbaev B.I. *Intensivnoe jenergosberezhenie v pererabotke mineral'nogo syr'ja. (Intensive energy saving in the processing of mineral raw materials). Astana, published. KazATU. 2018. 167.*
- 19 Gong Y., Tang J., Zhao D. Application of iron sulfide particles for groundwater and soil remediation: A review. *Water Res. 2016. 3. 34-42. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.063*
- 20 Ahmetov N.S. *Obshhaja i neorganicheskaja himija. (General and inorganic chemistry). M.:High School. 2001. 230.*
- 21 Abisheva Z.S, Blajda I.A, Ponomareva E.I. *Kislотно-jekstrakcionnaja tehnologija izvlechenija gallija iz zoly-unosa ot szhiganiya jenergeticheskikh uglej (Acid-extraction technology for extraction of gallium from fly ash from the combustion of energy coals). Cvetnye metally= Non-ferrous metals. 1994, 3. 36-38.*
- 22 Dihanbaev B.I., Dihanbaev A.B. *Perspektivy bezothodnogo szhiganiya jekibastuzskogo uglja pod kotlom teplovyh jelektricheskikh stancij (Prospects for the non-waste burning of Ekibastuz coal under the boiler of thermal power plants). Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference "Academic science-problems and achievements", - North Charleston, USA, 2015. 2. 211-217.*
- 23 Dihanbaev B.I., Dihanbaev A.B. *Razrabotka ehnergosberegajushhej sistemy bezothodnoj pererabotki svincovyh koncentratov na baze reaktora inversii faz (Development of an energy-saving system of non-waste processing of lead concentrates based on a reactor inversion phase). Povyshenie kachestva obrazovaniya i nauchnyh issledovanij: mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf.=International scientific and practical conference "Improving the quality of education and research". - Ekibastuz, Kazahstan, 2008. 459-463.*