

А 2010  
4569

УДК 669.4.04.003.18(47)

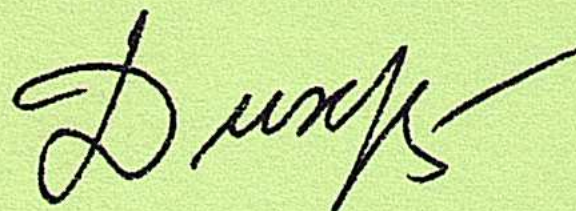
На правах рукописи

**ДИХАНБАЕВ БАЯНДЫ**

**Разработка безотходных систем энергосберегающей переработки  
свинцово-цинкового сырья и создание высокоэффективного плавильного  
оборудования**

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук



Республика Казахстан  
Караганда, 2010

369. 2). 8

Работа выполнена в РГП «Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан»

**Научный консультант:**

академик НАН РК, доктор технических наук  
профессор

Жарменов А.А.

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор  
доктор технических наук, профессор  
доктор технических наук,

Исабаев С.М.  
Шевко В.М.  
Сулейменов Е.Н.

**Ведущая организация:** Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева

Защита состоится «30» сентября 2010 г. 10<sup>00</sup> часов на заседании Диссертационного совета Д 53.40.01 при ДГП Химико-металлургическом институте им. Ж. Абишева РГП «НЦ КИМС РК» по адресу: 100009, г. Караганда, ул. Ермакова, 63, Тел./факс: 8(7212) 43-31-61;  
E-mail: [hmi\\_science@mail.ru](mailto:hmi_science@mail.ru); [hmi2009@mail.ru](mailto:hmi2009@mail.ru)

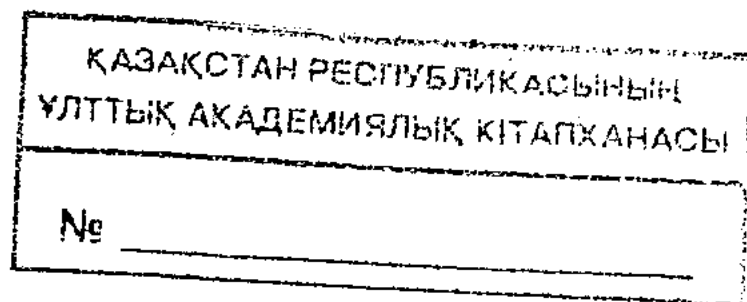
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ДГП «ХМИ им. Ж. Абишева» РГП «НЦ КИМС РК» по адресу: 100009, г. Караганда, ул. Ермакова, 63,

Автореферат разослан «06» августа 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 53.40.01  
доктор технических наук



Жумашев К.Ж.



## ВВЕДЕНИЕ

**Общая характеристика работы.** Диссертация посвящена решению научно-прикладной задачи совершенствования технических средств и технологии процесса переработки свинцово-цинкового сырья (жидких штейнсодержащих и твердых отвальных шлаков свинцовой плавки, свинцовых концентратов, свинцово-цинковых руд). Разработан новый интенсивный способ обработки грубодисперсного минерального сырья – «слой расплава с инверсией фаз – пересыпающийся слой материала в закрученном потоке газов», на базе которого создан плавильный агрегат принципиально нового типа «реактор инверсии фаз – трубчатая печь» (РИФ-ТП). Проведено опытно-промышленное испытание РИФ-ТП и выполнено исследование процессов плавки шлака и восстановления цинка в слое инверсии фаз. Разработаны новые теплотехнологические схемы безотходных, экологически безопасных и энергосберегающих систем переработки Pb-Zn сырья на базе агрегата РИФ-ТП. Показана применимость предлагаемых схем для совместной переработки отвальных цинксодержащих шлаков и оловянных концентратов, производства минеральных удобрений и кормовых фосфатов из фосфоритов.

Работа выполнена в соответствии с Республиканской целевой научно-технической программой «Научно-техническое обеспечение устойчивого функционирования и стратегических приоритетов развития горно-металлургического комплекса Республики Казахстан на 2001 год».

**Актуальность работы.** Ресурсоэнергосбережение в высокотемпературной технологии является одним из важнейших рычагов повышения эффективности производства и снижения вредного воздействия на окружающую среду.

В свинцово-цинковой промышленности, как и в других отраслях цветной металлургии, перерабатывающей руду с небольшим содержанием металлов и допускающей значительное количество отходов, затраты на топливо превышают 40% от стоимости продукции. На стадии обогащения Pb-Zn руд в отходы переводят до 90% тонкоизмельченной породы, до 50% ценных компонентов - в шламы флотации.

С целью оценки фактического состояния материало- и энергоиспользования, выявления причин и источников возникновения потерь энергетических и материальных ресурсов, загрязнения окружающей среды была разработана карта материалоэнергопотребления (МЭП) производства свинца и переработки шлаков. По данным карты МЭП, в традиционной системе «агломерация – шахтная плавка – фьюмингование» значение коэффициента материальной безотходности, как отношение полезных компонентов в отвальном шлаке (Zn, Pb, Cu, Fe, силикаты) к исходному их количеству, поступивший на плавку составляет ~50%, суммарного показателя безотходности ~25%, а теплового КПД ~30%. Экологическая обстановка в производстве свинца является весьма напряженной. Концентрация вредных выбросов CO, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, парогазовой смеси летучих компонентов при мокрой грануляции шлака и штейна в несколько раз превышает ПДК. Относительный объем вредных выбросов соизмерим с общим выходом материальных отходов

(соответственно 0,75 т/тPb и 1,17 т/тPb).

Коэффициент материальной безотходности для фьюминг-процесса составляет ~11%, для вельцпроцесса ~9%. Коэффициент использования тепловых отходов фьюминг-печи не превышает ~14%, а вельцпечи ~10%.

Анализ литературных данных показывает, что, несмотря на широкие исследования, технология производства свинца и переработки шлаков пока еще не располагает техническими решениями, в комплексе обеспечивающими высокие технологические, энергетические и экономические характеристики. Отмеченным устанавливается актуальность задач поиска направлений, способов и технических средств радикального улучшения материалознергосберегающих и экологических характеристик процесса переработки Pb-Zn сырья.

**Цель работы:** Разработка безотходных, энергосберегающих и экологически совершенных систем переработки свинцово-цинкового сырья (жидких и отвальных шлаков, свинцовых концентратов, Pb-Zn руд), интенсивных методов обработки сырья и создание на их основе высокопроизводительного, непрерывнодействующего, универсального при смене технологии и качества исходного материала плавно-восстановительного агрегата, отвечающего всем технологическим требованиям разрабатываемых систем.

**Научная новизна работы** заключается в том, что впервые:

– на основе нового способа научного познания, метода предельного ресурсознергосбережения, разработана поисковая модель, позволившая определить последовательность и содержание отдельных ступеней поиска новых технологий, способов и технических средств для реализации систем комплексной, экологически совершенной переработки Pb-Zn сырья с использованием принципов безотходности и термодинамически идеальной установки;

– разработан принципиально новый способ обработки зернистых шихт - режим слоя расплава с инверсией фаз, заключающийся в том, что при истечении газовой струи с околосвуковой скоростью в локализованный слой расплава вначале образуется газожидкостная эмульсия, где газовая фаза находится в жидкости в виде пузырьков, затем при расширении газа в свободном объеме жидкая фаза переходит в дискретное, а газовая в сплошное состояние; установлен диапазон устойчивого существования слоя в пределах изменения критерия гидродинамического подобия  $I_c / G_b = 0,19 - 1,0$ ;

– исследована закономерность изменения массы ванны от производительности слоя по шлаку; установлена прямолинейная зависимость массы ванны от производительности, отражающая соотношение подъемных сил газового потока и сил тяжести, вязкости и поверхностного натяжения капель расплава в слое;

– выявлен экстремальный характер зависимости степени извлечения цинка  $E$  от параметра продувки - критерия Рейнольдса, при постоянном значении относительного межсоплового расстояния  $S/d = 3,5$ ; установлено,

что при  $Re = 7,44 \cdot 10^4$   $E = E_{max}$ , а при  $Re = 11,07 \cdot 10^4$   $E = 0$ ; данное явление объясняется тем, что при увеличении диаметра сопел, соответствующего критерию  $Re = 11,07 \cdot 10^4$ , время пребывания частиц шлака в слое становится меньше времени их плавления, что не способствует образованию слоя расплава;

– изучена закономерность изменения степени извлечения цинка от производительности слоя по шлаку; установлено, что с уменьшением производительности (то же, с уменьшением массы ванны) степень извлечения цинка увеличивается по экспоненциальной зависимости, что объясняется уменьшением времени полного перемешивания расплава в слое и интенсивным обновлением межфазной поверхности реагирования;

– исследована макрокинетика восстановления цинка из расплава; установлено: закономерность изменения концентрации цинка в слое инверсии фаз описывается уравнением первого порядка; скорость возгонки цинка в слое инверсии фаз в 2 раза выше, чем в кипящем слое расплава и в 3 раза – чем в барботажном слое;

– изучена зависимость скорости возгонки цинка от производительности слоя по шлаку; определено, что при снижении производительности в 2 раза (с 1139 кг/ч до 540 кг/ч) скорость возгонки цинка возрастает в 20 раз, что отражает процесс увеличения газового импульса относительно уменьшающейся массы ванны, который приводит к уменьшению времени полного перемешивания расплава и интенсивному раскрытию поверхности диспергированных капель, реагирующих с высокоскоростной и высокотемпературной газовой струей; расчетно установлено, что при таком снижении производительности слоя в прогнозируемом образце реактора инверсии фаз производительностью по шлаку 31 т/ч удельный расход топлива будет в 2,1 раза меньше, чем в действующей вельщечи, перерабатывающей шлак идентичного состава.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика расчетной оценки теплотехнологических и геометрических характеристик агрегата нового поколения «реактор инверсии фаз – трубчатая печь» (РИФ - ТП), разработанная на основе физических моделей мгновенно соударяющихся – разделяющихся капель расплава в слое идеального смешения без внешнедиффузионного сопротивления для газов и встречно-подъемного движения газов относительно одиночной частицы в сыпающемся слое материала, позволившая спроектировать, создать и испытать установки производительностью 1, 2, 4, 15 т/ч.

2. Новые эффективные способы обработки свинцово-цинкового сырья – режим слоя расплава с инверсией фаз и комбинация двух интенсивных теплотехнологических принципов – «слой расплава с инверсией фаз – пересыпающийся слой материала в закрученном потоке газов», обеспечивающие сокращение расхода топлива в 2-3 раза и повышение удельной производительности слоя в 3-4 раза при переработке отвальных шлаков по сравнению с действующими способами фьюмингования жидких и

вельцевания твердых шлаков.

3. Результаты испытаний опытно-промышленных установок – удельная производительность и удельные теплотери, гидро – и аэродинамические характеристики, положенные в основу методики перерасчета режимных данных опытной установки на ее прогнозируемый образец.

4. Новая эффективная технология – энергохимическая аккумуляция газов и ее аппаратное оформление, заключающаяся в превращении физической теплоты высокотемпературных газов в химически связанную энергию, путем эндотермической обработки топлива на окислительных компонентах ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ) отходящих газов реактора инверсии фаз, с получением в трубчатой печи охлажденных до  $1000^\circ\text{C}$  горючих газов с высоким восстановительным потенциалом и последующим его сжиганием в воздухонагревателе; реализация данной технологии устранит перегрев шлака на выгрузочном конце трубчатой печи, обеспечит повышение температуры воздуха до уровня, позволяющего проводить процесс без обогащения дутья кислородом и откроет путь к восстановлению высших оксидов железа до закиси железа в пересыпающемся слое шлака.

5. Методика перерасчета режимных показателей опытной установки на ее промышленный образец, основанная на новых критериях подобия (гидродинамического, удельной производительности и удельных тепловых потерь), отражающих условия проведения эксперимента и на новых безразмерных коэффициентах, характеризующих статьи теплового баланса прогнозируемого агрегата РИФ – ТП; новая теплотехнологическая схема прямого получения свинца из сульфидных концентратов безобжиговым способом, на базе агрегата РИФ – ТП, обеспечивающая повышение коэффициента безотходности в 8-10 раз, теплового КПД в 3-4 раза и коэффициента использования техногенных отходов в 2,5-3 раза; универсальность теплотехнологической схемы для переработки отвальных шлаков, шлакоштейновых расплавов, Pb – Zn руд и оловянных концентратов.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на технических совещаниях – Усть-Каменогорского свинцово-цинкового комбината (г.Усть-Каменогорск, ноябрь 1991г.), корпорации «Казцветмет» (г.Алма-Ата, апрель 1992г.), комбината «Ачполиметалл» (г.Кентау, сентябрь 1992г.), закрытого акционерного общества «Южполиметалл» (г.Шымкент, апрель 2001г.), Британской компании ZincOX (Брюссель, февраль 2006г.), Болгарского комбината КСМ-2000 (г.Пловдив, апрель 2007г.); на научно-практических конференциях – «Проблемы энергетики теплотехнологии» (г.Москва, сентябрь 1991г.), «Перспективные направления развития химии и химической технологии» (г.Шымкент, сентябрь 1999г.), «Ауезовские чтения-2» (г.Шымкент, ноябрь 1999г.), «Теория и практика интенсификации, ресурсоэнергосбережения в химической технологии и металлургии» (Шымкент – Алматы, май 2000г.), «Ауезовские чтения-3» (г.Шымкент, ноябрь 2002г.), «Перспективы развития образования и науки» (г.Шымкент, май 2004г.), «Повышение качества образования и научных исследований (г.Экибастуз, апрель 2008г.), VI Беремжановский съезд по химии

и химической технологии» (г.Караганда, сентябрь 2008г.), «Гинцветмет-90 лет в цветной металлургии» (г.Москва, сентябрь 2008г.), «Комплексная переработка минерального сырья» (г.Караганда, октябрь 2008г.).

**Практическая ценность работы** заключается в следующем.

– разработан новый теплотехнологический способ обработки твердых шлаков – режим слоя расплава с инверсией фаз. Разработаны карты материалозэнергопотребления и экологической обстановки действующих систем производства свинца и переработки шлаков свинцовой плавки и тепловые схемы практических моделей систем непрерывной, безотходной и энергосберегающей переработки шлаков, свинцовых концентратов, Pb-Zn руд и других видов минерального сырья;

– спроектированы и созданы опытные и опытно-промышленные установки на базе реактора инверсии фаз производительностью 1, 2, 4, 15т/ч. При испытаниях данных установок выявлены их универсальность, т.к. конструкция позволяет, помимо возгонки цинка и восстановления железа, осуществлять плавку фосфоритов на минеральные удобрения и кормовые обесфторенные фосфаты, совместно перерабатывать цинксодержащие шлаки и оловянные концентраты;

– показано, что в сопоставимых условиях переработка шлаков на установке на базе 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 вельпечах, перерабатывающих шлаки идентичного состава; по удельному расходу топлива восстановление цинка из «бедных» и «богатых» шлаков в реакторе инверсии фаз примерно одинаково, что опровергает установившееся мнение о нерентабельности переработки «бедных» по цинку отвальных шлаков. Экономический эффект от внедрения предлагаемых систем при производительности по шлаку 25 т/ч составит 350-380 млн. тенге/год;

– безотходные, энергосберегающие теплотехнологические схемы прямого получения свинца из концентратов и прямой переработки свинцово-цинковых руд совместно с отвальными шлаками обеспечивают повышение теплового КПД в предлагаемых системах в 2-3 раза, по сравнению с традиционными системами производства свинца. Разработанные системы могут применяться для экономичной переработки фосфоритов Каратау на кормовые обесфторенные фосфаты и оловянных концентратов - на олово-возгоны. Достижимый при этом экономический эффект при производительности по шихте 30 т/ч составит 300-500 млн. тенге/год. Теплотехнологическая схема совместной переработки отвальных цинксодержащих шлаков и оловянных концентратов на базе агрегата РИФ-ТП при производительности предлагаемой системы по шихте 4 т/ч позволит получить экономический эффект 100 млн. тенге/год.

Новизна и практическая значимость работы подтверждены 2 авторскими свидетельствами СССР, 1 предпатентом, 2 патентами РК и 4 актами опытно-промышленных испытаний.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1 Теплотехнологические предпосылки реализации высокоэффективного плавильно-восстановительного агрегата для переработки отвальных цинксодержащих шлаков

Изложены результаты разработки теоретических основ создания высокопроизводительного плавильно-восстановительного агрегата «реактор инверсии фаз – трубчатая печь» для вновь формируемых систем безотходной переработки отвальных цинксодержащих шлаков.

На основе анализа теплотехнологической схемы действующей системы вельцевания отвальных шлаков определены значения основных коэффициентов, характеризующих эффективность материало-и энергоиспользования в системе: показатель безотходности по шихте  $\beta_{\text{Ш}} = 9\%$ , суммарный показатель безотходности вельцустановки  $\psi = 15\%$ , тепловой КПД вельцпечи  $\eta_{\text{тепл}}^{\text{ВП}} = 25\%$ , тепловой КПД котла-утилизатора  $\eta_{\text{тепл}}^{\text{КУ}} = 35\%$ , тепловой КПД вельцустановки  $\eta_{\text{тепл}}^{\text{ВУ}} = 30\%$ , топливный КПД вельцпечи и вельцустановки  $\eta_{\text{топ}}^{\text{ВП}} = 32\%$ ,  $\eta_{\text{топ}}^{\text{ВУ}} = 52\%$ , коэффициент использования тепловых отходов вельцустановки  $\eta_{\text{исп}}^{\text{ТО}} = 10\%$ .

Весьма невысокая технологическая и энергетическая эффективность и неблагоприятный экологический фон процесса вельцевания шлаков стимулирует поиск интенсивных способов безотходной и энергосберегающей переработки отвальных шлаков, включающий расчетно-теоретическое обоснование для создания высокопроизводительного плавильного агрегата.

В качестве эффективного способа выбрана комбинация двух новых интенсивных теплотехнологических принципов – «слой расплава с инверсией фаз» – «пересыпающийся слой материалов в закрученном потоке газов». Агрегат, реализующий данный способ, назван «реактор инверсии фаз – трубчатая печь с закрученным потоком газов» (РИФ-ТП).

Формирование системы уравнений для расчета параметров слоя инверсии фаз основывалось на следующей принятой физико-химической модели процесса:

– гидродинамический режим в реакторе инверсии фаз (ИФ) близок к идеальному смешению;

– расплав в слое ИФ состоит из частиц размером  $d_z$ , с конечной концентрацией  $C = C_K$ ; средний логарифмический концентрационный напор газов  $\Delta C_r$  по сечению и высоте слоя одинаков, вероятность выхода каждой частицы из слоя ИФ одна и та же;

– время «жизни» частиц между их слияниями в слое одинаково, а именно  $\tau^* = \tau_{\text{пер}} / n$ , где  $\tau_{\text{пер}}$  – время полного перемешивания расплава при внесении в слой импульсного возмущения по концентрации,  $n$  – количество столкновений частиц, поступающих в слой с концентрацией  $C > C_K$ , с частицами в слое,



имеющими  $C < C_K$ , до заданной полноты выравнивания концентрации  $C_K$  в слое;

– жидкие частицы по истечении времени  $\tau^*$  мгновенно сталкиваются, сливаются, перемешиваются и заново разделяются, что приводит к выравниванию концентрации в объеме частицы и обновлению межфазной поверхности реагирования;

– за время  $\tau^*$  подвод молекул  $ZnO$  к поверхности раздела газ-расплав осуществляется в условиях нестационарной молекулярной диффузии. Эта стадия определяет скорость всего процесса восстановления цинка из частиц;

– эффективным будем считать взаимодействие частиц, имеющих  $C > C_K$ , только с частицами, имеющими  $C < C_K$ ;

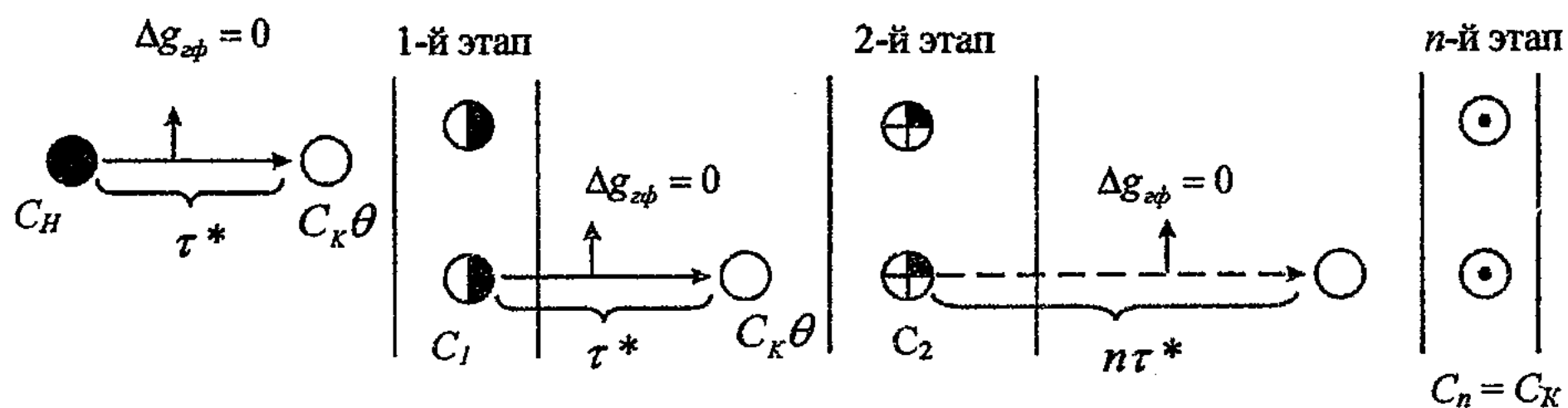
– механизм, обуславливающий восстановление  $ZnO$  с поверхности реагирования, заключается в столкновении одной молекулы  $ZnO$  и одной молекулы  $CO$  ( $H_2$ ), что приводит к образованию одного атома  $Zn^f$  и одной молекулы  $CO_2$  ( $H_2O$ ).

Условно примем, что в момент времени  $\tau = 0$  в слое находится  $N$  расплавленных частиц с  $d_{\text{ж}}$ ,  $C = C_K$ . За время  $\tau^*$  в слой поступает  $M$  твердых частиц шлака с характерным размером  $d_{\text{ш}}$ ,  $C > C_K$  и нагретых до температуры плавления ( $t_{\text{ш}} \leq t_{\text{плав}}$ ), которые обволакиваются расплавленными частицами и равномерно распределяются по слою. Масса твердых частиц, поступающих в слой за время  $\tau^*$ , несоизмеримо мала по сравнению с массой расплавленных частиц в слое, а  $d_{\text{ш}} \ll d_{\text{ж}}$ , что позволяет пренебречь изменением эквивалентного диаметра частиц расплава в слое.

Твердые частицы плавящегося шлака получают тепло посредством конвективного теплообмена от расплавленных частиц, которые восполняют эти затраты тепла за счет конвективной теплоотдачи от газов. Процессы плавления твердых частиц и перегрева расплавленных частиц совмещены во времени, причем расплав мгновенно удаляется с поверхности плавящейся частицы. Температура газов принимается одинаковой по высоте слоя инверсии фаз и равной температуре отходящих газов реактора инверсии фаз. Значение коэффициента теплоотдачи от расплавленной частицы к плавящейся частице шлака,  $\alpha_p$ , принято постоянным в слое инверсии фаз.

За время  $\tau^*$  из слоя восстанавливается  $\Delta g(\tau^*)$  количество окиси цинка, температура нагретой частицы поднимается до температуры плавления, к концу  $\tau^*$  концентрация частиц в слое уменьшается и становится  $C = C_K \theta$ . Затем происходит мгновенное взаимодействие  $N$  и  $M$  частиц, что приводит к выравниванию концентрации слоя до  $C = C_K$ .

Для определения количества этапов столкновений частиц  $n$ , приводящих к выравниванию концентрации цинка в слое до  $C = C_K$ , принята приближенная схема взаимодействия частиц, показанная на рисунке 1.



$\Delta g_{z.f.}$  – количество цинка, возгоняемого за время  $\tau^*$  с частицы с  $C > C_K$

Рисунок 1 – Принципиальная схема взаимодействия частиц в слое

На основе физико-химической сущности процесса разработана математическая модель расчета параметров слоя инверсии фаз.

Время возгонки цинка из шлака:

$$\tau_{воз} = \frac{\tau_{пер}(C_H - C_K)}{C_K(1 - \theta)n}, \quad (1)$$

где  $\theta$  – средняя по объему частицы безразмерная концентрация ZnO.

Производительность реактора инверсии фаз:

$$P_{РИФ} = \frac{M_s}{\tau_{воз} + Kg \cdot \tau_{тепл}}, \quad (2)$$

где  $M_s$  – масса ванны слоя инверсии фаз,

$Kg$  – эмпирический коэффициент, отвечающий за тепловую однородность частиц на выходе из слоя;

$\tau_{тепл} = \tau_{нагр} + \tau_{пл}$  – теоретическое время тепловой обработки частиц шлака, поступающих в слой, состоящее из времени нагрева ( $\tau_{нагр}$ ) и плавления ( $\tau_{пл}$ ).

Расход природного газа в реактор инверсии фаз:

$$V = \frac{P_{РИФ} [C_{ш} (t_p - t_{ш}) + q_{пл} + q_{энд} - \Delta C_{Zn} \cdot C_{ш} \cdot t_{ш}] + F_{ос} \cdot q_{ос}}{Q_H^p + \alpha v_s^0 C_s t_s - (1 + \alpha v_s^0) (C_{ог} t_{ог} + v_{со} q_{со} + v_{H_2} q_{H_2} + v_{Zn}^r \cdot q_{Zn}^r)}, \quad (3)$$

где  $P_{РИФ}$  – производительность реактора по твердому шлаку, кг/ч;

$C_{ш}$  – теплоемкость, шлака, кДж/кг·гр;

$t_{ш}, t_p$  – температура шлака и расплава;

$C_s, C_{ог}$  – теплоемкость подогретого воздуха и отходящих газов, кДж/м<sup>3</sup>·°C;

$q_{пл}, q_{энд}$  – удельный расход тепла на плавление шлака и эндотермическое восстановление цинка из расплава, кДж/кг;

$\Delta C_{Zn}$  – доля восстановленного цинка в расплаве;

$v_{со}, v_{H_2}, v_{Zn}^r$  – объемные доли CO, H<sub>2</sub> и паров цинка в отходящих газах, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$q_{со}, q_{H_2}, q_{Zn}^r$  – теплота сгорания CO, H<sub>2</sub> и паров цинка в отходящих газах, кДж/м<sup>3</sup>;

$q_{oc}$  – удельные потери теплоты через огнеую поверхность реактора,  $\text{кДж/м}^2 \cdot \text{С}$ ;  
 $Q_H^P$  – теплота сгорания природного газа,  $\text{кДж/м}^3$ ;  
 $\alpha$  – коэффициент расхода воздуха;  
 $v_s^0$  – удельный расход воздуха для полного сгорания природного газа.

Площадь огнеой поверхности реактора определяется из эмпирически полученной формулы:

$$F_{oc} = 12,5H\sqrt{F_{np}} + 15F_{np}, \text{ м}^2, \quad (4)$$

$H$  – высота расширенного слоя инверсии фаз, м;

$F_{np}$  – площадь продувочной решетки реактора,  $\text{м}^2$ ,

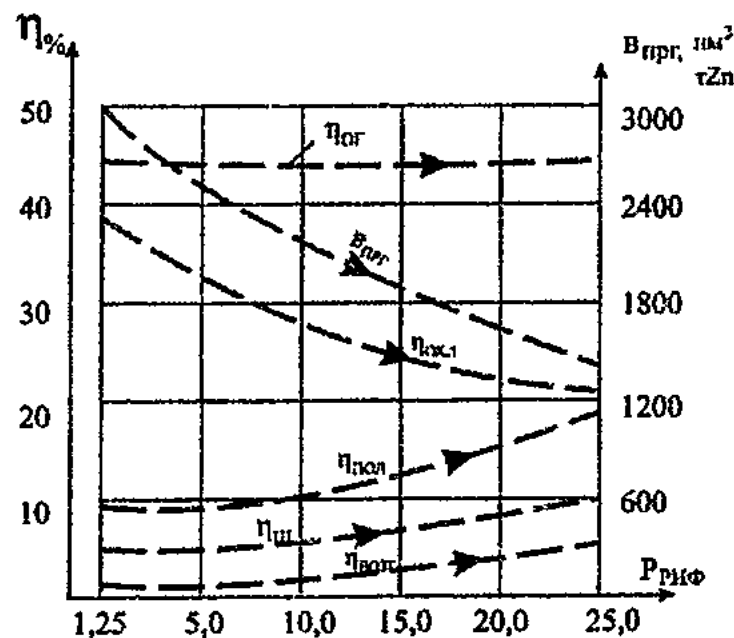
$$F_{np} = \frac{M_s}{h_o \cdot \rho_p}, \quad (5)$$

где  $h_o$  – высота «спокойного» слоя расплава в реакторе, м;

$\rho_p$  – плотность расплава,  $\text{кг/м}^3$ .

На базе математической модели разработан алгоритм расчета геометрических характеристик реактора инверсии фаз, включающий расчеты горения топлива и теплопотерь через гарниссажную футеровку, расчеты гидродинамических характеристик слоя инверсии фаз, проведены расчеты геометрических размеров трубчатой печи и теплопотерь через кладку печи, материальные и тепловые балансы реактора инверсии фаз и трубчатой печи, тепловые и температурные графики основных элементов опытных установок на базе агрегата РИФ-ТП.

На рисунке 2 показаны графики изменения характеристик РИФ, построенные на основании его расчетных тепловых балансов. Как видно из рисунка 2, с ростом производительности реактора с 1,25 т/ч до 25 т/ч по шлаку доля полезной использованной теплоты повысится в 2 раза, доля теплоты с охлаждающей водой снизится в 2 раза, а расход топлива сократится также в 2 раза.



$\eta_{пол}, \eta_{охл}, \eta_{ог}, \eta_{ш}, \eta_{возг}$  – доли теплот, полезной использованной, с охлаждающей водой, отходящими газами, шлаком и возгонами, соответственно,  $V_{прг}$  – удельный расход природного газа

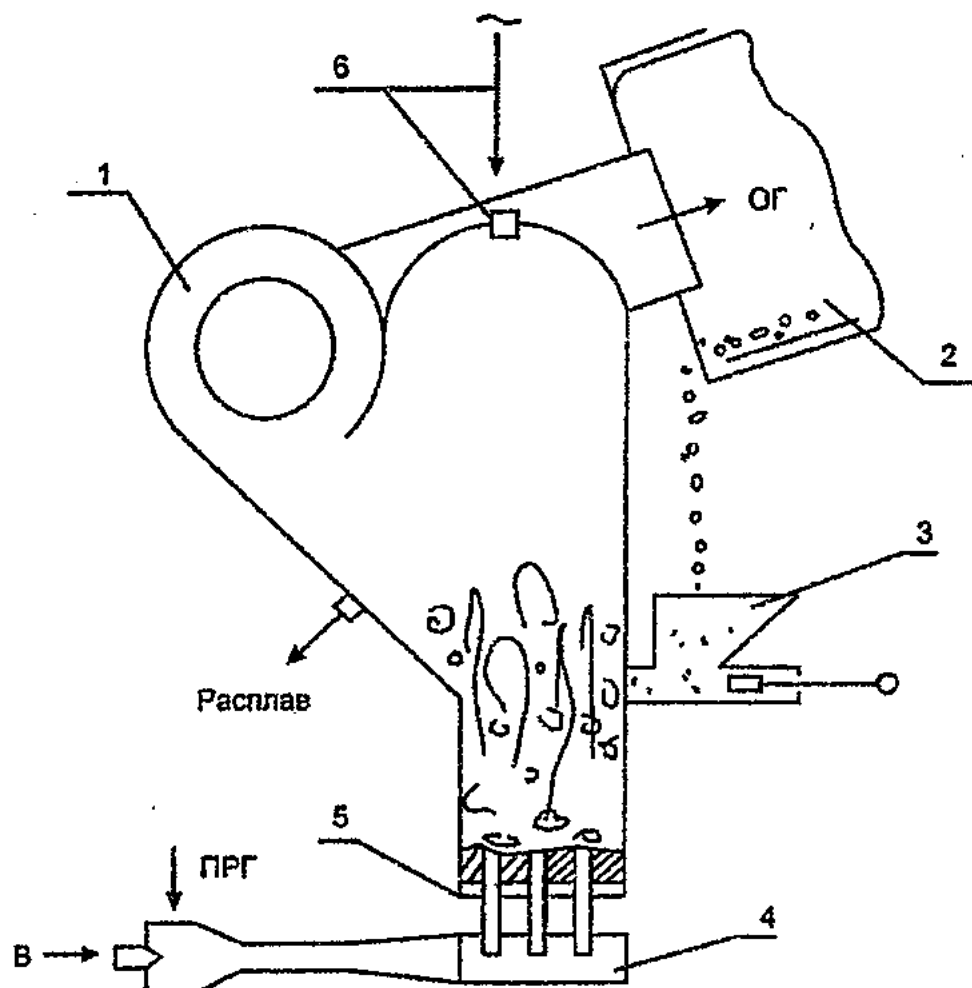
Рисунок 2 – Расчетная зависимость теплотехнических характеристик от производительности РИФ

## 2 Проектирование и создание опытных установок по переработке отвальных шлаков на базе агрегата РИФ-ТП

Спроектированы и созданы опытные установки по переработке отвальных цинксодержащих шлаков на базе агрегата РИФ-ТП.

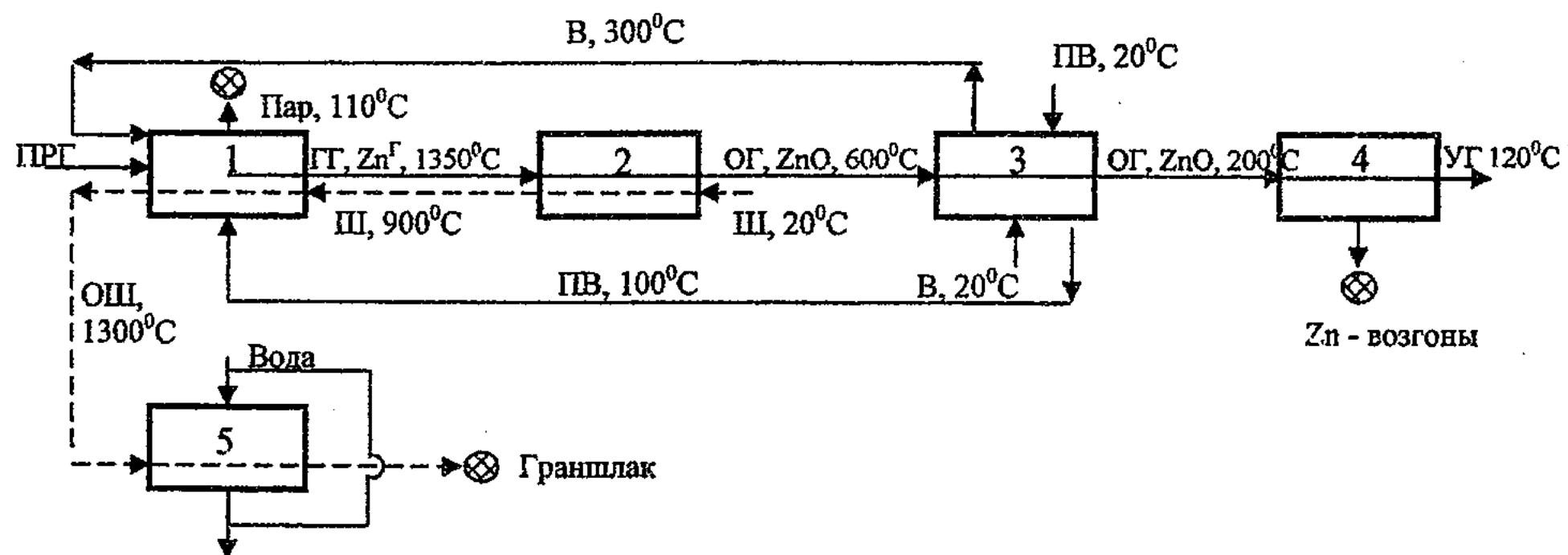
На АО «Шымкентский свинцовый завод» под научным руководством автора была смонтирована опытная установка производительностью 4т/ч по отвальному шлаку.

На рисунках 3-4 показаны структурная схема агрегата РИФ-ТП и тепловая схема опытной установки производительностью 4т/ч.



1 – реактор инверсий фаз, 2 – трубчатая печь, 3 – шлакозагрузочное устройство с плунжерным механизмом, 4 – горелка-компрессор, 5 – продувочная решетка, 6 – отверстие и щуп для замера глубины ванны, В – сжатый дутьевой воздух, ПРГ – природный газ, ОГ – отходящие газы

Рисунок 3 – Структурная схема опытного плавильного агрегата «РИФ-ТП»

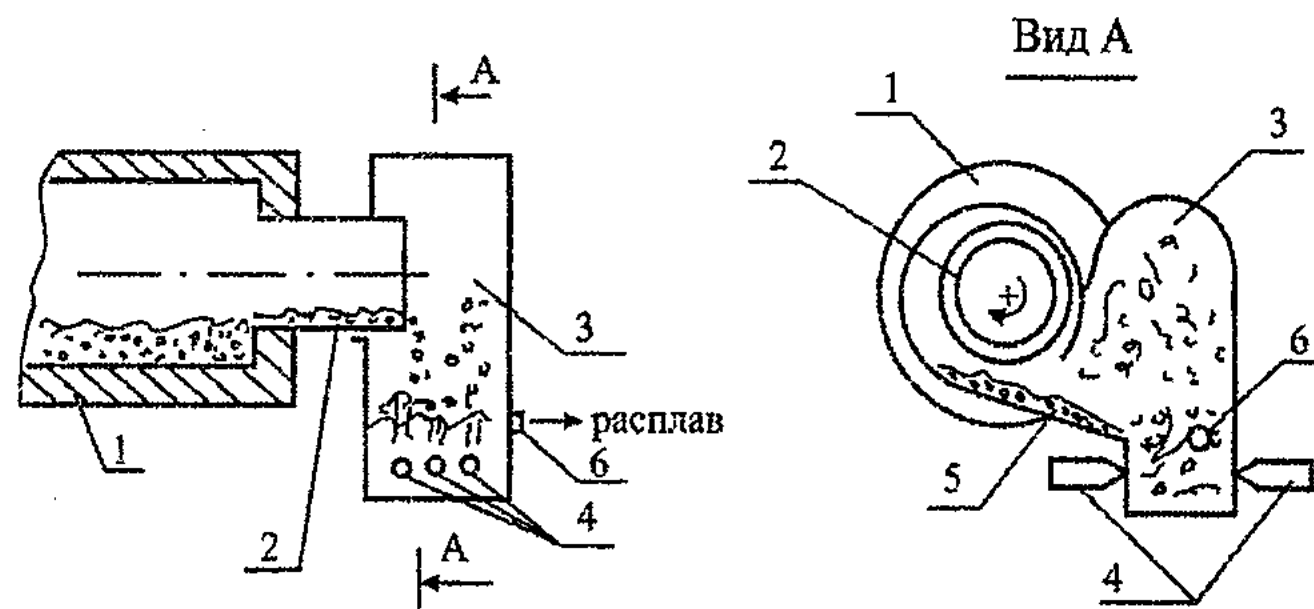


1-РИФ, 2-ТП, 3- ВЗП – экономайзер, 4-рукавные фильтры, 5 – «мокрый» гранулятор шлака. ОШ – отвальный шлак

Рисунок 4 – Тепловая схема установки по переработке отвальных шлаков

Общая масса шлаков, переработанных на установке, составила ~30тн. В результате проведенных опытов на установке получены следующие результаты: подтверждена работоспособность основного агрегата установки – «реактор инверсии фаз – трубчатая печь»; апробирована новая конструкция топливосжигающего устройства «горелка - компрессор», работающая под расплавом при низком давлении природного газа; достигнуты положительные результаты при плавлении шлаков, но при восстановительном процессе работа горелки-компрессора оказалась малоэффективной по сравнению с топкой, степень извлечения цинка не превышала 35-40%; работа плунжерного шлакозагрузочного устройства на горячем шлаке оказалась неудовлетворительной, что требует дальнейшего совершенствования его конструкции.

На ЗАО «Южполиметалл» была построена установка на базе агрегата РИФ-ТП производительностью по отвальному шлаку 15т/ч. Вариант загрузки предусматривал прямую подачу шлака через сепарационную камеру реактора, в противотоке с высокотемпературным газовым потоком (рисунок 5).



1 – трубчатая печь, 2 – вращающийся загрузочный газоход, 3 – реактор, 4 – топки, 5 – настель, 6 – торцевая летка для выпуска расплава

Рисунок 5 – Прямая загрузка шлака из трубчатой печи в реактор инверсии фаз

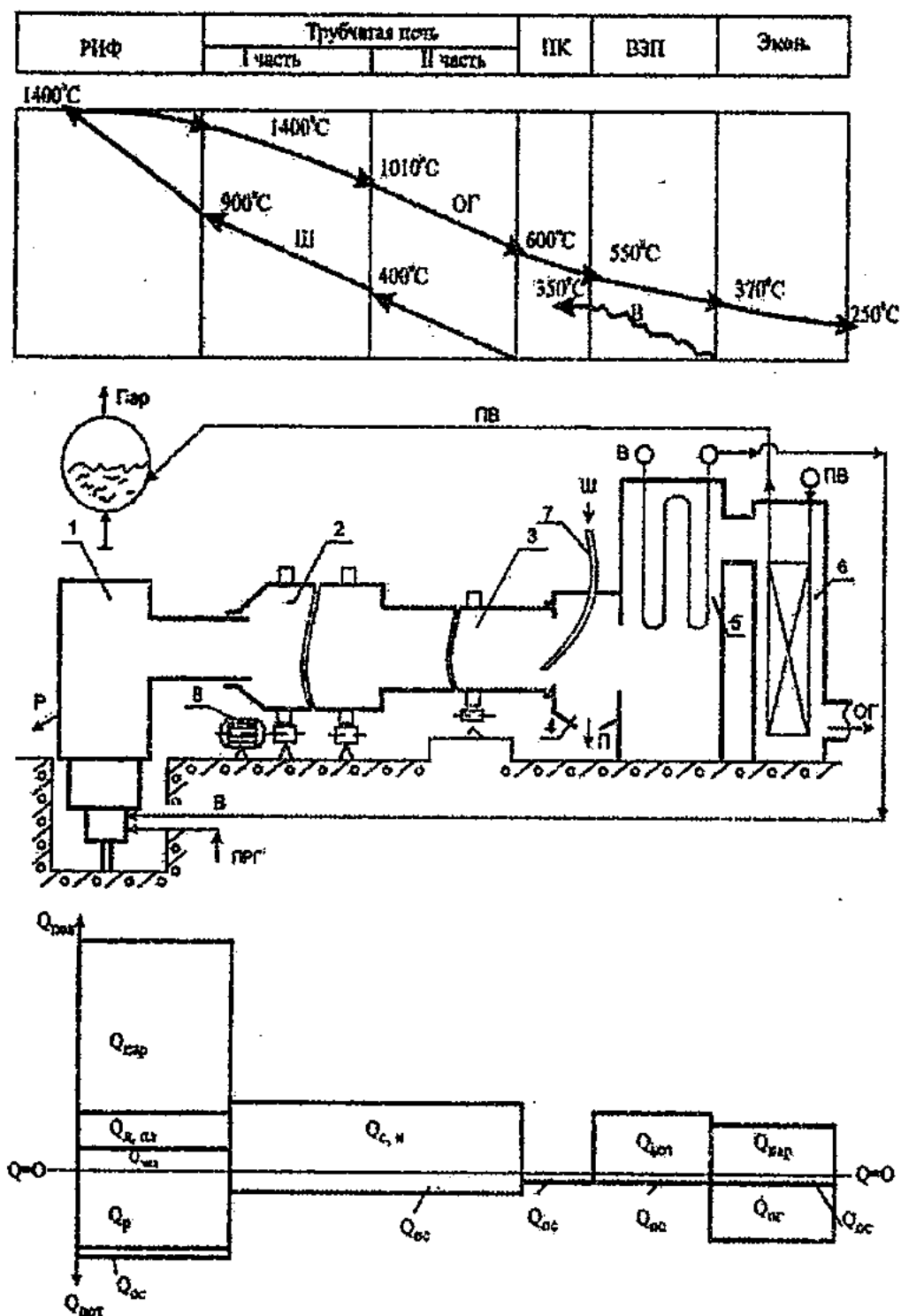
В результате экспериментов было переработано около 80т отвального шлака. Реактор инверсии фаз с принудительным испарительным охлаждением работал устойчиво. Но из-за отсутствия надежноработающего загрузочного устройства горячего шлака из трубчатой печи в реактор, низкого давления дутьевого воздуха ( $P_B=0,7$  ати) работа установки была оценена неудовлетворительной.

Следующая пилотная установка на базе агрегата РИФ-ТП, с расчетной производительностью по шлаку  $P=1,25$ т/ч, была спроектирована и смонтирована на территории ТОО «Отрар», г.Шымкент.

На рисунке 6 показаны структурная схема, температурный и тепловые графики пилотной установки.

Произведена наладка отдельных узлов, водного и тяго-дутьевого режима установки. Система охлаждения реактора инверсии фаз и топки с

противодавлением переведены с проточно-водяного на естественное испарительное охлаждение.



1—реактор инверсии фаз (РИФ), 2,3—первая и вторая части трубчатой печи, 4- пылевая камера, 5—воздухоподогреватель (ВЗП), 6—конвективный пучок, 7—загрузочная труба шлака, 8—привод трубчатой печи, ПРГ, В - природный газ и дутьевой воздух, Ш, П – шлак и пыль, Р- расплав, ПВ – питательная вода, ОГ – отходящие газы,  $Q_{пол}$ ,  $Q_{пот}$  - теплота полезноиспользуемая и тепловые потери,  $Q_{энд}$  - теплота эндотермической реакции возгонки цинка,  $Q_{д, пл}$  - теплота догрева и плавления шлака, поступающего с трубчатой печи,  $Q_{пар}$  - теплота на выработку пара,  $Q_p$  - теплота обработанного в реакторе расплава,  $Q_{с, н}$  - теплота сушки и нагрева исходного шлака,  $Q_{воз}$  - теплота нагрева дутьевого воздуха,  $Q_{ос}$  - тепловые потери в окружающую среду,  $Q_{ог}$  - теплота отходящих газов

Рисунок 6 – Температурный и тепловые графики пилотной установки производительностью 1,25 т/ч (Расчет)

Разработано новое устройство непрерывной загрузки раскаленного шлака из трубчатой печи в плавильный реактор. Бесперебойность работы предлагаемого устройства достигается строгим выдерживанием соотношения «инжектирующий воздух / транспортируемый шлак» и непрерывным ведением процесса в реакторе.

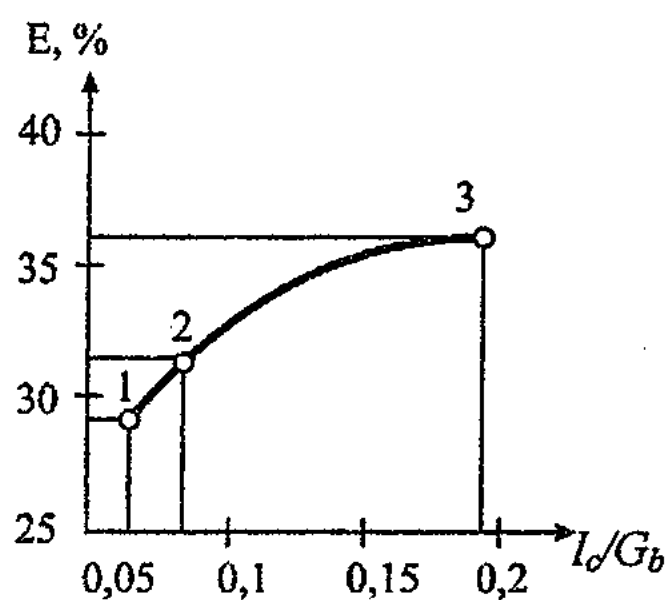
### 3 Проведение экспериментов на пилотной установке на базе агрегата РИФ-ТП

Изложены результаты экспериментов на пилотной установке на базе агрегата РИФ-ТП и методика пересчета опытных данных на промышленный образец. Общее количество переработанного «бедного» по цинку шлака ~250т, «богатого» ~150т, фосфоритной мелочи ~5т.

Приводится методика и порядок проведения экспериментов. Транспортная производительность трубчатой печи составляет ~1800кг/час. Производительность реактора инверсии фаз (РИФ) при плавлении горячего шлака (950°C) вдвое больше чем при расплавлении холодного шлака (20°C). Опыты по уменьшению огневой поверхности РИФ на 10% показывают экономию природного газа ~30нм<sup>3</sup> на каждый квадратный метр сокращенной поверхности.

Проведены эксперименты, целью которых являлся поиск диапазона изменения критерия гидродинамического подобия  $I_c / G_b$  (импульс газов / вес ванны), в пределах которого эффективность восстановления цинка была бы наилучшей. На рисунках 7, 8 представлены графики зависимости степени извлечения цинка  $E$  и массы ванны  $M_b$  от критерия  $I_c / G_b$ . В соответствии с рисунками 7, 8 можно сделать вывод, что в режиме кипящего слоя расплава (КСР) при уменьшении массы ванны с одновременным снижением производительности слоя по шлаку можно добиться увеличения степени извлечения цинка  $E$ , при этом значение  $E$  не превышает 35-36%.

Рассмотрение рисунков 9,10,11 показывает, что в режиме слоя расплава с инверсией фаз (СИФ) при  $I_c / G_b = 0,42$  степень извлечения цинка составляет 76%, при изменении производительности слоя масса ванны меняется по прямолинейному закону, а зависимость степени извлечения цинка от производительности описывается по экспоненциальной кривой.



1- тест (26-27).05.05; 2-тест (7-8).05.05; 3-(1-2).11.05

Рисунок 7 – Экспериментальная зависимость степени извлечения цинка  $E$  от критерия  $I_c / G_b$  в режиме кипящего слоя расплава

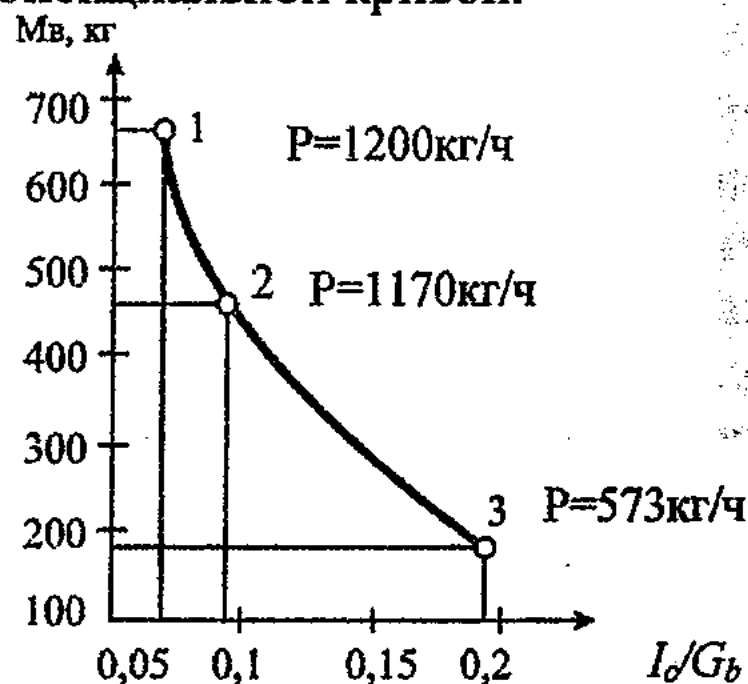
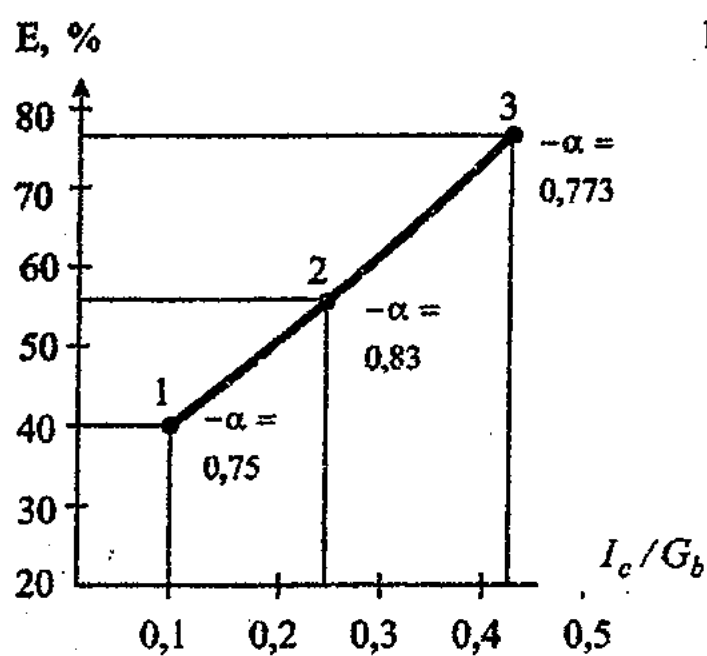
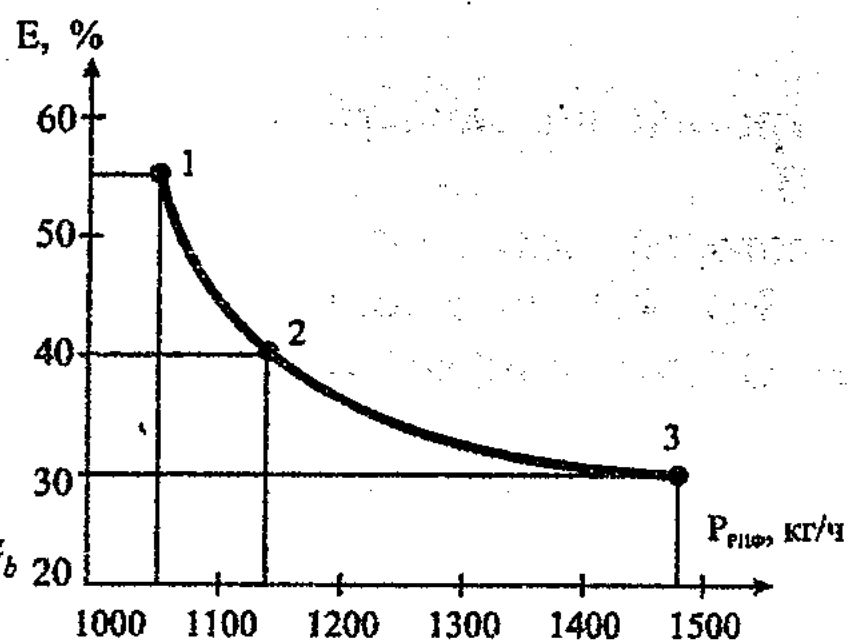


Рисунок 8 – Экспериментальная зависимость массы ванны  $M_b$  от критерия  $I_c / G_b$  в режиме кипящего слоя расплава



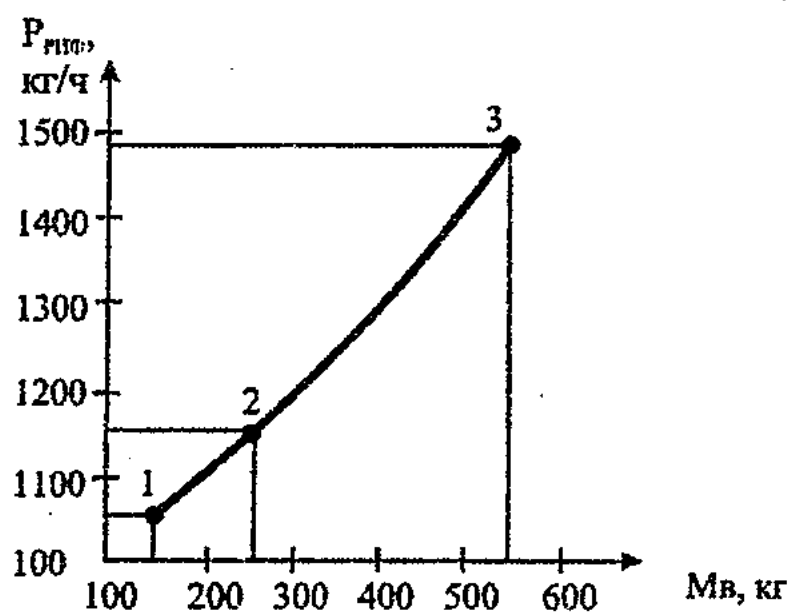
1 – тест (7-8).12.05,  $P_{\text{РИФ}}=1139$ кг/ч,  $\alpha = 0,75$ ; 2 – тест (15-16). 09.05,  $P_{\text{РИФ}} = 1058$  кг/ч,  $\alpha = 0,83$ ; 3 – тест (7-8).11.05,  $P_{\text{РИФ}} = 693$  кг/ч,  $\alpha = 0,773$

Рисунок 9 – Экспериментальная зависимость степени извлечения цинка от критерия  $I_c/G_b$  в режиме слоя инверсии фаз



1 – тест (15-16).09.05,  $I_c/G_b = 0,26$ ,  $\alpha = 0,83$ ; 2 – тест (7-8).12.05,  $I_c/G_b = 0,091$ ,  $\alpha = 0,75$ ; 3 – тест (1-2).09.05,  $I_c/G_b = 0,0577$ ,  $\alpha = 0,78$ .

Рисунок 10 – Экспериментальная зависимость степени извлечения цинка от производительности РИФ в режиме слоя инверсии фаз



1 – тест (15-16).09.05,  $I_c/G_b = 0,26$   
2 – тест (7-8).12.05,  $I_c/G_b = 0,091$   
3 – тест (1-2).09.05,  $I_c/G_b = 0,0577$

Рисунок 11 – Экспериментальная зависимость массы ванны от производительности РИФ в режиме слоя инверсии фаз

На рисунке 12, а показан график зависимости степени извлечения цинка от критерия  $I_c/G_b$  в диапазоне изменения режимов кипящего слоя расплава и слоя расплава с инверсией фаз. Рассмотрение рисунка 12, а приводит к заключению, что режим слоя инверсии фаз при значении  $I_c/G_b = 0,83$  по степени извлечения цинка  $E$  имеет максимальный показатель –  $E=78\%$ , а при дальнейшем увеличении  $I_c/G_b$  величина  $E$  уменьшается.

На рисунке 12, б изображена зависимость степени извлечения цинка  $E$  от параметра, характеризующего интенсивность продувки в соплах продувочной



решетки – критерия Рейнольдса, при отношении межсоплового расстояния к диаметру сопла  $S/d = 3,5$  и различных значениях количества и диаметра сопел ( $n \times d$ ).

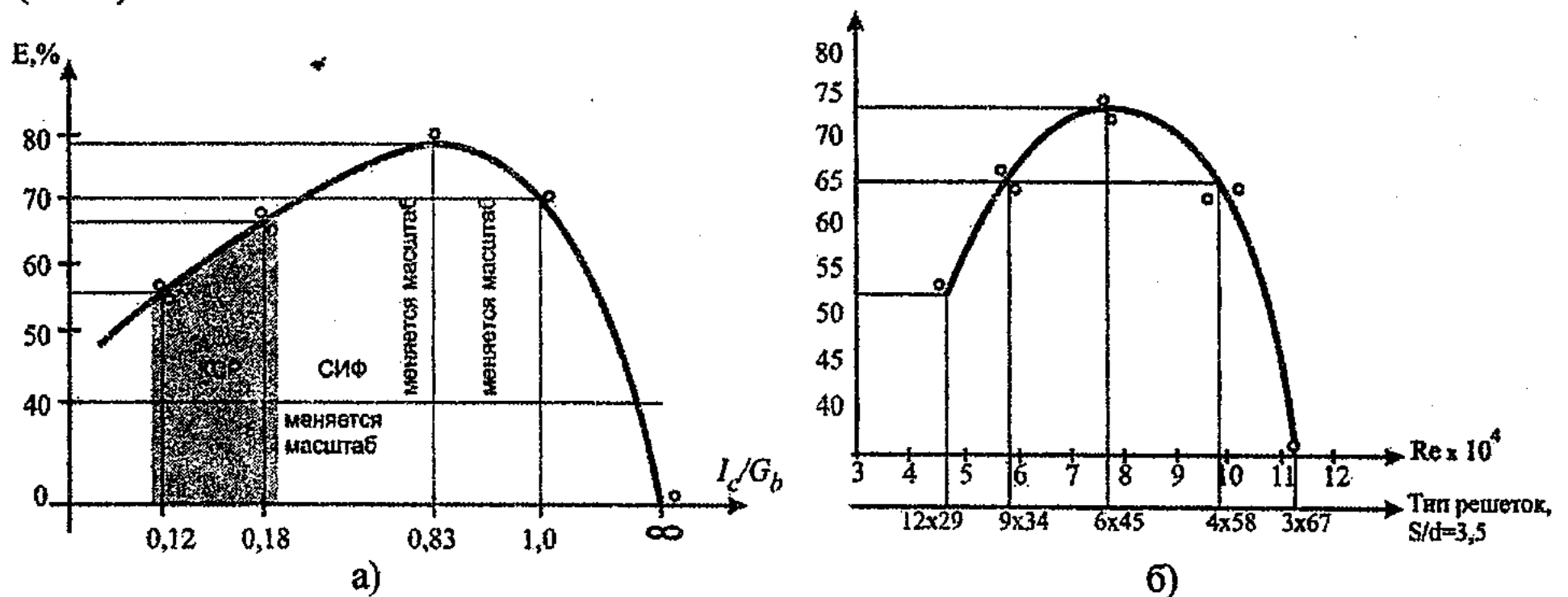


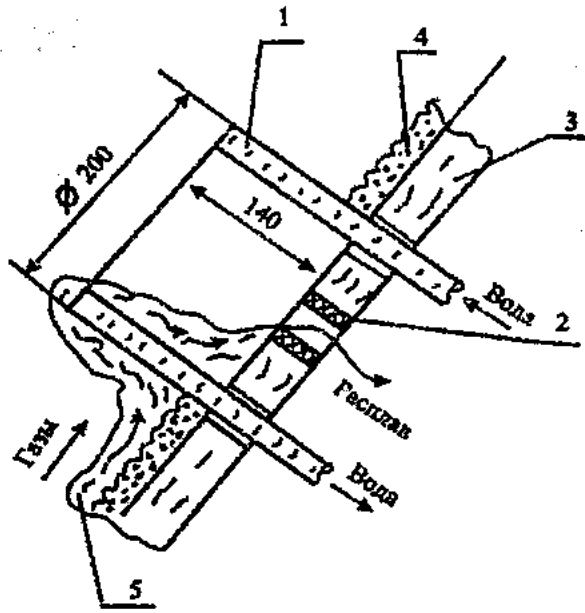
Рисунок 12 – Характер зависимости степени извлечения цинка из расплава от интенсивности продувки (а) и от типа продувочных решеток (б) при производительности реактора  $P_{РИФ} \sim 1300$  кг/ч. «Бедный» шлак

Из рассмотрения рисунка 12, б можно сделать вывод, что из всех испытанных продувочных решеток – (6x45), (9-1)x34, (9x34) и (12x29) по извлечению цинка самой эффективной является решетка (6x45). В ряду решеток (3x67), (6x45), (9x34) и (12x29) степень извлечения цинка  $E$  имеет экстремальный характер, при (6x45) и  $Re = 7,44 \cdot 10^4 - E = E_{max}$ , при (3x67) и  $Re = 11,1 \cdot 10^4 - E = 0$ .

Для выяснения роли закрученного потока газов в сепарационной камере реактора на степень извлечения цинка были проведены ряд тестов с увеличением высоты летки фронтального кессона,  $h_d = 0,7; 0,9; 1,05; 1,25$  м.

Результаты опытов показывают, что закрученный поток газов в сепарационной камере не вносит значимый вклад в восстановление цинка.

Для разъяснения положения о том, что для РИФ в режиме слоя инверсии фаз существует определенная зависимость массы ванны от производительности, при постоянном значении газового импульса через продувочную решетку и давлении в реакторе, были проведены два варианта экспериментов. В первом варианте тесты проводились для разных высот фронтальной летки, в м: 0,7; 0,9; 1,05; 1,25. Результаты опытов убеждают, что при равномерном питании шлаком и постоянном значении газового импульса и давления в реакторе высота расположения летки не влияет на формирование массы ванны. Во втором варианте внутри реактора устанавливали полый кессонированный цилиндр, concentrically расположенный к отверстию фронтальной летки (рисунок 13).



1 – полый кессонированный цилиндр, 2 – летка, 3- фронтальный кессон реактора, 4- гарниссажный слой, 5 – пленка расплава стекающего в цилиндр

Рисунок 13 – Общий вид водоохлаждаемого цилиндра

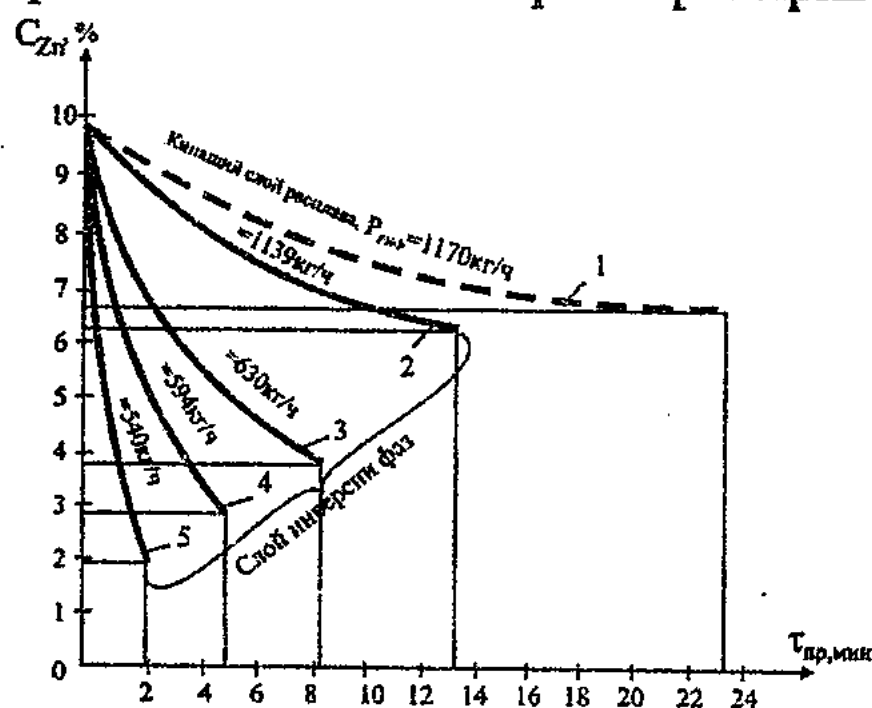
Результаты опытов показывают, что несмотря на то, что на пути расплава создан искусственный барьер высотой 140мм, увеличения массы ванны не происходит.

Результаты девятичасовой непрерывной восстановительной плавки шлака в режиме слоя инверсии фаз также доказывают, что длительность проведения тестов не влияет на формирование массы ванны в реакторе.

Сравнение уровня топливопотребления переработки «богатого» и «бедного» по цинку шлаков в сопоставимых условиях приводит к примечательному факту, что эти процессы по удельному расходу природного газа в условиях слоя инверсии фаз примерно одинаковы:

$$v^{\text{бедн}} = 7,69 \frac{\text{нм}^3}{\text{кг Zn} \cdot \text{час}}, \quad v^{\text{богат}} = 7,11 \frac{\text{нм}^3}{\text{кг Zn} \cdot \text{час}} \quad (6)$$

Результаты экспериментов по изучению макрокинетики восстановления цинка в кипящем слое расплава и слое инверсии фаз приведены на рисунке 14.

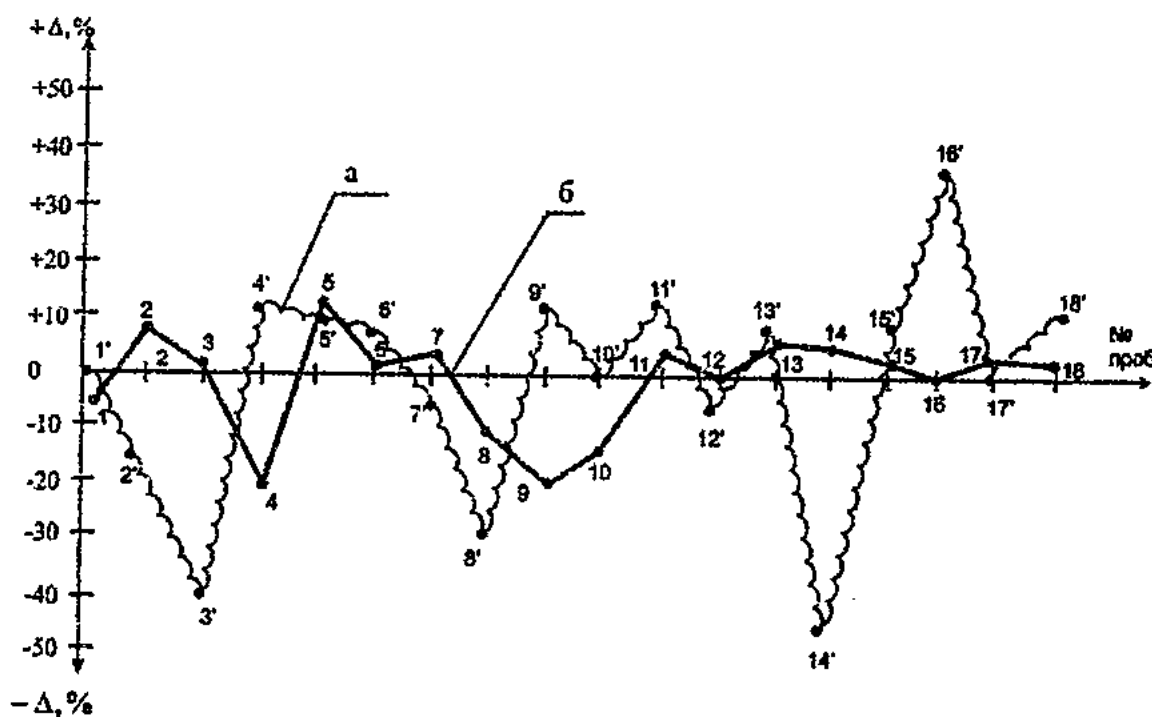


Эксперименты от: 1-(6-8).05.05; 2-(7-8).12.05; 3-(21-22).10.05; 4-30.11.05; 5-13.10.04  
 $v_1=0,0166$  л/мин;  $v_2=0,0344$ ;  $v_3=0,11$ ;  $v_4=0,25$ ;  $v_5=0,785$

Рисунок 14 – Макрокинетика восстановления цинка в режимах кипящего слоя и слоя расплава инверсии фаз в зависимости от производительности реактора по шлаку (непрерывный режим)

В соответствии с рисунком 14, скорость реакции в слое инверсии фаз ( $v_2$ ) вдвое больше, чем в кипящем слое ( $v_1$ ), а с уменьшением производительности слоя по шлаку в 2 раза значение " $v$ " увеличивается в 20 раз. При уменьшении производительности слоя с 1139 кг/ч до 540 кг/ч удельный расход условного топлива (у.т.) на пилотной установке составляет 7800 кг у.т./т Zn, что на 22% превышает удельный расход топлива действующей печи Лениногорского полиметаллического комбината (6070 кг у.т./т Zn). Однако, при масштабировании пилотной установки на производительность 31 т/ч удельный расход топлива сократится в 2,1 раза.

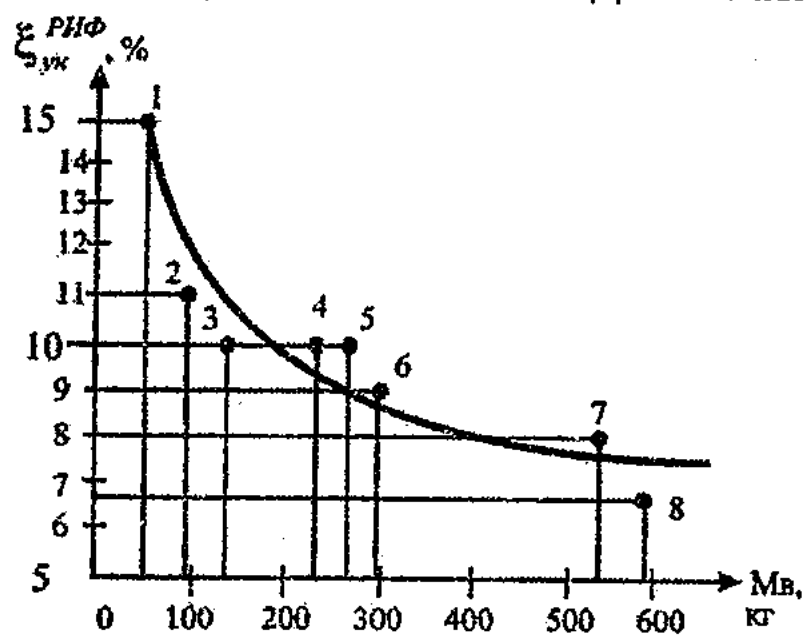
Из рассмотрения рисунка 15 видно, что расход шлака и концентрация цинка в расплаве в режиме слоя инверсии фаз меняется во времени с неравномерной циклическостью. Амплитуда колебаний от среднего значения для расхода шлака доходит до  $\pm 40\%$ , а для концентрации цинка в расплаве - до  $\pm 20\%$ .



а - часовой расход расплава с летки, б - концентрация цинка в расплаве.

Рисунок 15 - Характер отклонения производительности летки и конечной концентрации цинка от среднего значения при фронтальном выпуске расплава из реактора

На рисунке 16 показано графическое выражение результатов опытов, определяющих зависимость доли шлакоуноса от массы ванны реактора.

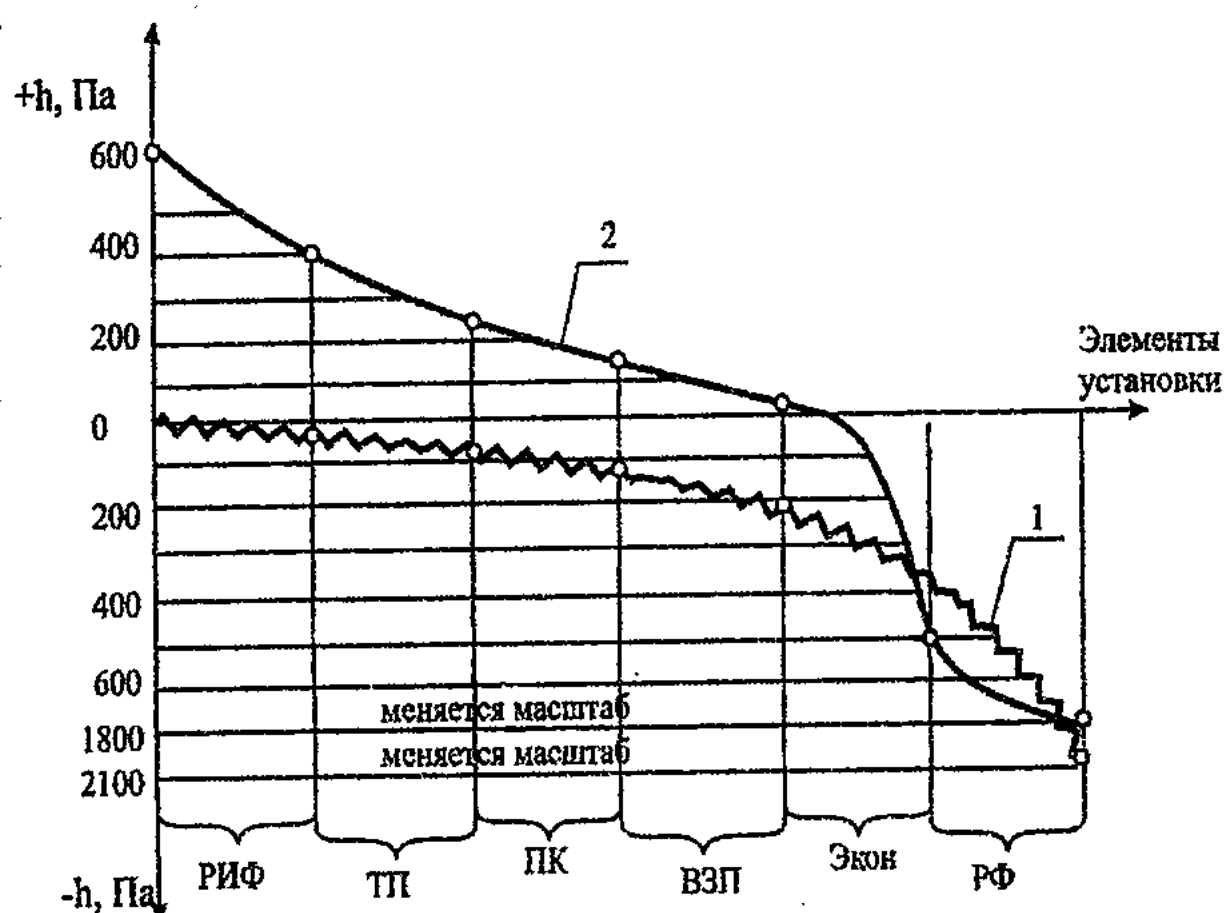


- |                         |                         |
|-------------------------|-------------------------|
| 1 - тест 19.02.05;      | 5 - тест (7-8).12.05;   |
| 2 - тест (27-28).10.06; | 6 - тест (2-3).07.05;   |
| 3 - тест (15-16).09.05; | 7 - тест (1-2).09.05;   |
| 4 - тест (7-8).10.05;   | 8 - тест (14-15).07.05. |

Рисунок 16 - Экспериментальная зависимость шлакоуноса из реактора инверсии фаз от массы ванны

Из рисунка 17 видно, что разрежение в газовом тракте на протяжении опыта меняется от минусового значения до плюсового, а в конце эксперимента давление в реакторе возрастает до 600 Па. Основной причиной такого повышения давления в установке является зарастание гарниссажом водоохлаждаемого газохода, соединяющего реактор с трубчатой печью, вследствие шлакоуноса из реактора.

Согласно расчетам, произведенным на основании математической модели реактора инверсии фаз, с ростом агрегатной производительности реактора с  $R_{РИФ}=0,693\text{т/ч}$  до  $31,25\text{т/ч}$ , в сопоставимых условиях, удельный расход условного топлива сократится более чем в два раза по сравнению с тем же показателем в вельцпечи Лениногорского полиметаллического комбината.



$h$  – разрежение (давление) в тракте установки, 1 – режим в начале эксперимента, 2 – режим в конце эксперимента. РИФ – реактор инверсии фаз, ТП – трубчатая печь, ПК – пылевая камера, ВЗП – воздухоподогреватель, Экон-экономайзер, РФ – рукавные фильтры

Рисунок 17 – Характер изменения тягодутьевого режима пилотной установки на протяжении эксперимента

Тесты по извлечению германия из шлаков показывают, что в условиях слоя инверсии фаз восстановление Ge почти совпадает со степенью извлечения цинка из расплава ( $E \sim 76\%$ ).

Разработаны и испытаны новые устройства для прямого сжигания газа в расплаве: горелка – компрессор (ГК), для сжигания газа низкого давления и горелка прямого сжигания газа среднего давления (ПСГ). Тесты с использованием ПСГ по плавлению фосфоритной мелочи на минеральное удобрение показали хорошую плавильную способность данной горелки.

С целью снижения перегрева шлака в трубчатой печи (ТП) и одновременного повышения температуры дутьевого воздуха были проведены экспериментальные исследования нового способа – энергохимической аккумуляции (ЭХА) реакторных газов в ТП пилотной установки. В процессе проведения ЭХА, в выгрузочном конце ТП устранен перегрев шлака, в

загрузочной части осуществлен дожиг ЭХА-газов, в результате которого появилась возможность повышения температуры дутьевого воздуха в воздухоподогревателе (ВЗП) до уровня, позволяющего отказаться от применения кислорода. Регламентированное охлаждение восстановительных газов РИФ способом ЭХА откроет путь к двухступенчатому извлечению железа из шлаков в агрегате РИФ-ТП: в ТП – твердофазное восстановление при температуре шлаков 700-800<sup>0</sup>С, и в РИФ – жидкофазное восстановление железа в медьсодержащий чугун при температуре расплава 1300-1400<sup>0</sup>С.

На рисунке 18 показано графическое изображение результатов расчетных и экспериментальных данных. Расхождение по основным газовым компонентам (Н<sub>2</sub>, СО, СО<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) между опытом и расчетом не превышает 10-15%.

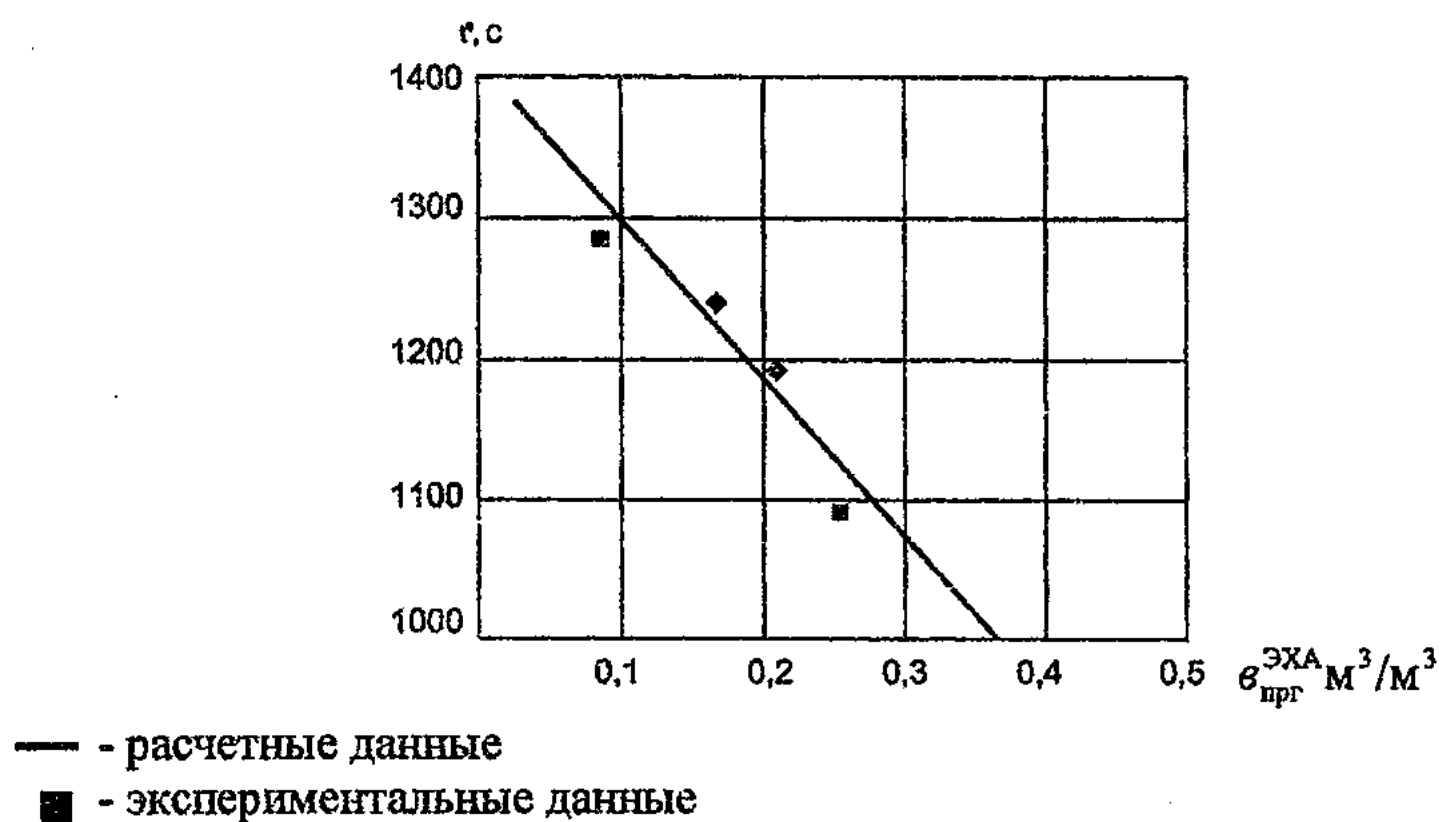


Рисунок 18 – Зависимость температуры ЭХА-газов от удельного расхода природного газа на конверсию

Расчетная методика, разработанная на основе математической модели реактора, будучи необходимой для проектирования пилотной установки, является недостаточной для прогнозирования параметров промышленных установок в силу неадекватности условий, принятых в расчете и имевших место в опыте, а именно: расхождение в значениях давления дутьевого воздуха в расчете (2ати) и опыте (0,5ати); увеличение количества Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в результате переокисления шлака в трубчатой печи; окисляющее влияние компрессорного воздуха, инжектирующего шлак в реактор; повышение давления в реакторе, оказывающее подавляющее влияние на возгонку свинца и цинка из слоя.

Для переноса экспериментальных данных пилотной установки на промышленную разработана методика перерасчета на основе афинных моделей.

На базе новых инвариантов подобия гидродинамики слоя инверсии фаз, удельной производительности слоя и тепловых потерь через гарниссажную футеровку и безразмерных коэффициентов, характеризующих статьи теплового баланса прогнозируемой установки, произведен расчет параметров образца по

следующей, полученной в диссертации формуле:

$$\left( \varepsilon - 15 \cdot C \cdot q_{OC} \cdot W_{пр}^{-1} \right) B - \left( 12,5 \cdot C^{0,5} \cdot q_{OC} \cdot W_{пр}^{-0,5} \right) H \cdot B^{0,5} - a P_{ш} = 0, \quad (7)$$

где:  $a = C_{ш} (t_p - t_{ш}) + q_{шл} + q_{энд} - \Delta C_{Zn} \cdot C_{ш} t_{ш}$

$$\varepsilon = Q_H^P + \alpha v_B^0 c_B t_B - \left( 1 + \alpha v_B^0 \right) \left[ C_{ог} t_{ог} + v_{CO} \cdot q_{CO} + v_{H_2} q_{H_2} + v_{Zn}^F \cdot q_{Zn} \right];$$

$$C = \frac{(1 + \alpha v_B) \beta_{пр}}{3600}; \quad F_{пр} = \frac{B \cdot C}{W_{пр}}; \quad (8)$$

Варьируя значениями  $H_i$  находим из (7) ряд значений расхода топлива –  $B_i$ . Подставляя  $B_i$  в (8), определяем  $(F_{пр})_i$ . Правильно найденное значение расхода топлива должно удовлетворять условию –  $[H_i (F_{пр})_i] = V^{СИФ}$ ;

$(V^{СИФ})^{обр} = (P_{ш})^{обр} / (P_V)^{модель}$ , где  $V^{СИФ}$  – объем, занимаемый слоем инверсии фаз.

Сравниваем найденное значение расхода топлива на реактор  $B_i$  с расходом топлива на установку «реактор инверсии фаз – трубчатая печь – воздухоподогреватель» (РИФ-ТП):

$$B_{уст} = \frac{P_{ш} \left[ (q_{ш} + q_{суш}) \cdot \xi_{П}^{ВЗП} - q_{ш} \cdot \xi_{экв} \right]}{Q_H^P \cdot \xi_{экв} + \alpha \cdot v_B^0 \cdot c_p \cdot t_B (\xi_{экв} + \xi_{П}^{ТП})} \quad (9)$$

Если  $B_i \neq B_{уст}$ , то повторяем расчет до получения тождества.

В таблице 1 приведены результаты переноса данных испытаний пилотной установки на промышленный образец методом аффинного моделирования.

Таблица 1 – Результаты перерасчета данных испытаний пилотной установки на промышленный образец (Е-80%)

Теплотехнические характеристики РИФ-ТП	Производительность по шлаку т/ч			
	ПУ	Прогнозируемый образец		
	0,693	5,0	12,0	25,0
Удельная огневая поверхность РИФ, м <sup>2</sup> /тZn	195	114,6	82,2	65,6
Удельный расход природного газа, РИФ-ТП нм <sup>3</sup> /тZn	6073	3264	2394	1919
Удельная объемная производительность, РИФ- ТП, тZn/м <sup>3</sup> ч	0,0086	0,014	0,014	0,014

Из результатов расчетов, сведенных в таблицу 1, видно, что при переработке холодных отвальных шлаков и росте агрегатной производительности РИФ от 0,693 т/ч до 25 т/ч можно ожидать сокращения удельного расхода топлива более чем в 3 раза.

#### 4 Разработка безотходных, энергосберегающих тепловых схем переработки свинцово-цинкового сырья на базе агрегата РИФ-ТП и МД-РИФ

Предложены тепловые схемы практических моделей непрерывной, безотходной и энергосберегающей переработки свинцово-цинкового сырья на базе высокопроизводительного плавильного оборудования – «миксер-дозатор-реактор инверсии фаз» (МД-РИФ) и «реактор инверсии фаз – трубчатая печь» (РИФ-ТП).

Разработан вариант тепловой схемы безотходной переработки штейнсодержащих жидких шлаков свинцовой плавки. В таблице 2 приведены сравнительные технико-экономические показатели действующей системы фьюмингования шлаков (ДС) и предлагаемой системы (ПС).

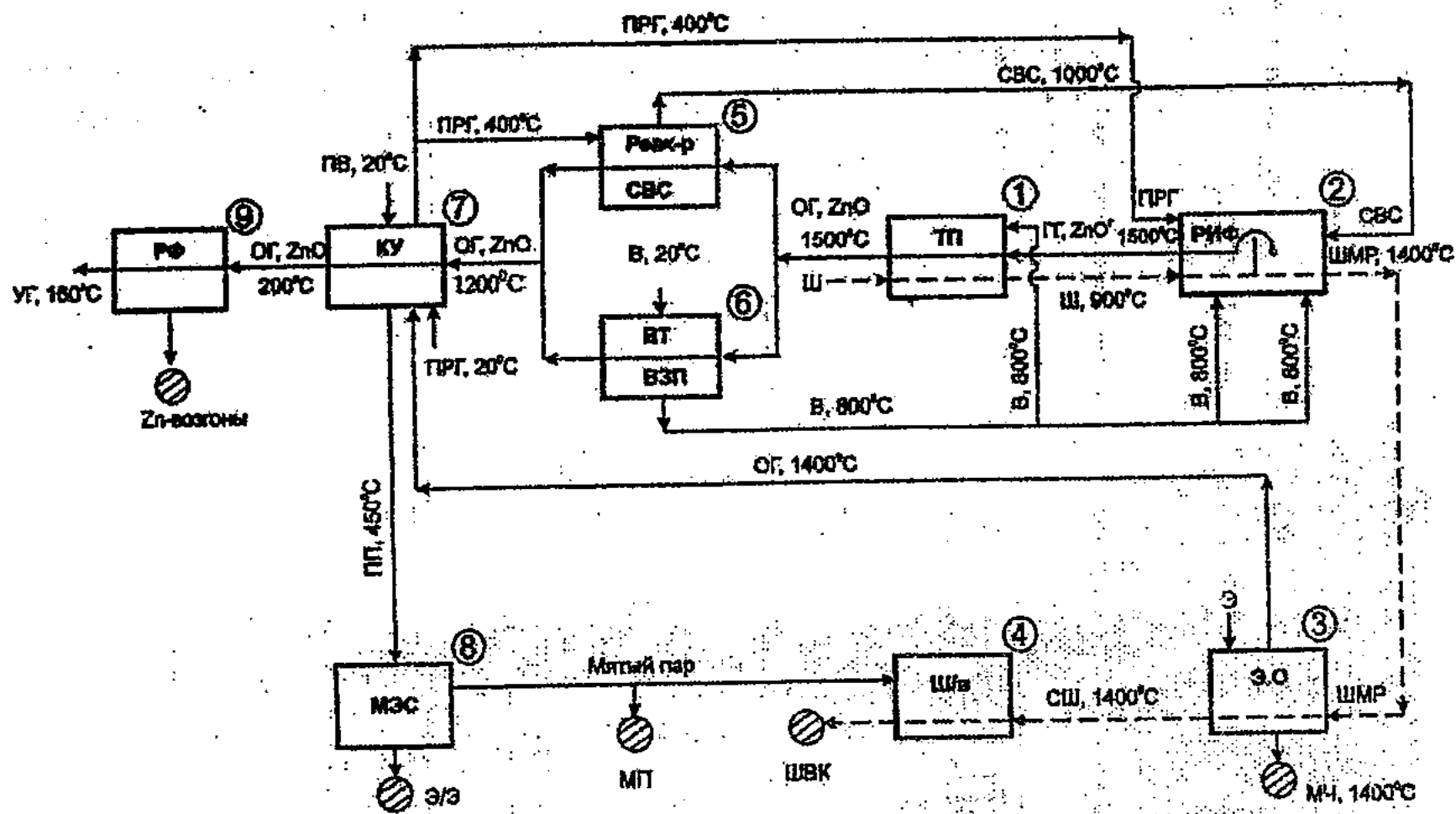
Таблица 2 – Техничко-экономические характеристики сравниваемых систем

Характеристика	Обознач.	Ед. изм.	ДС	ПС
Коэффициент материальной безотходности по шлаку	$\beta_{ш}$	–	11,0	76
Суммарный показатель безотходности	$\psi$	–	19,0	85,0
Коэффициент полезного использования первичного топлива по отношению к термодинамически идеальной системе	$\eta_{ТИС}$	–	8	74
Потенциал резерва энергосбережения	$\Delta B^{пот}$	$\frac{кг\ у.т.}{т\ Zn}$	894	27,0
Экономия приведенных затрат по отношению к действующей системе	$\mathcal{E}_{пр}$	млн. тенге/год	–	380,0

На рисунке 19 представлена тепловая схема безотходной переработки «бедных» по цинку шлаков на базе агрегата «реактор инверсии фаз – трубчатая печь» (РИФ-ТП). Экономический эффект от внедрения ПС при производительности по шлаку 25т/ч составит 350 млн.тенге/в год.

На основе высокоэффективного плавильно-восстановительного агрегата «реактор инверсии фаз – трубчатая печь», безотходной, гибкой при смене вида и качества сырья технологии, разработана энергосберегающая тепловая схема новой системы переработки свинцовых концентратов совместно с отвальными «бедными» по цинку шлаками (рисунок 20).

С внедрением новой теплотехнологической системы (ТТС) расход воды снизится в 1,92 раза, тепловые потери сократятся в 2,06 раза, вредные выбросы уменьшатся до предельно допустимой концентрации. Отходы ценных компонентов шлака (Pb, Zn, Cu, Fe) в среднем сократятся в 3 раза, использование энергии серы повысится в 8 раз, перевод силикатной части в полезный продукт - в 6,7 раза. Ликвидируется расход технологического кислорода, коксовой мелочи и дорогостоящего кокса.



1-трубчатая печь, 2-реактор инверсии фаз, 3-электропечь, 4-камера продувки шлаковаты, 5-реактор сероводородистой смеси (СВС), 6-высокотемпературный воздухоподогреватель, (ВТ ВЗП), 7-котел-утилизатор, 8-миниэлектростанция, 9-рукавные фильтры, Ш, ШМ, СШ – отвальный шлак, шлакометаллический расплав и силикатный шлак, соответственно, СВС, ПРГ – сероводородистая смесь и природный газ, В – дутьевой воздух, ГТ, ОГ, УГ – горючие газы, отходящие и уходящие газы, соответственно, МЧ – медистый чугун, ШВ-шлаковата, ЦВ – питательная вода, ПП – перегретый пар

Рисунок 19 – Тепловая схема системы безотходной переработки «бедных» отвальных шлаков.

За счет выработки дополнительной продукции ( $ZnSO_3$ , FeS, FeO, чугун, шлаковатные изделия и электроэнергия), удельный приведенный расход топлива в новой ТЭС снизится в 3,77 раза, а экономия топлива составит 960кг у.т./т Рв. Экономический эффект от реализации системы составит ~300 млн.тенге/год.

На основании безотходной технологии и высокопроизводительных агрегатов РИФ-ТП и МД-РИФ разработана тепловая схема энергосберегающей переработки трудновосстановимых свинцово-цинковых руд, представленная на рисунке 21.

Расчетно-установленное значение удельного расхода топлива на единицу плавящего цементного клинкера в предлагаемой системе прямой переработки труднообогатимой Рв-Zn руды на 16-20% ниже, чем в действующей системе, производящей цементный клинкер методом спекания.

Расчетная величина теплового КПД предлагаемой системы (78,8%) в 2,6 раза выше, чем тепловой КПД Чимкентского свинцового завода (30%).

Экономический эффект от внедрения предлагаемой системы составит ~500млн.тенге/год.

Разработана тепловая схема (ТС) производства кормовых обесфторенных фосфатов (КОФ), центральным элементом которой является агрегат РИФ-ТП.