

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 1 (2022)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/WRIX7218>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *к.т.н., доцент (Россия)*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD, доцент*
Шокубаева З. Ж. *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/QGAV3421>

***А. Б. Диханбаев¹, Б. И. Диханбаев², М. Б. Кошумбаев³,
С. Б. Ыбрай⁴**

¹Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева,
Республика Казахстан, г. Алматы;

^{2,3}Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина,
Республика Казахстан, Нур-Султан;

⁴Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск

К ВОПРОСУ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ РЕАКТОРА ИНВЕРСИИ ФАЗ В ИСКУССТВЕННЫЙ ГАЗ

В отвалах металлургических предприятий накоплено около 20 миллиардов тонн техногенных отходов, из них 8 миллиардов шлаки черной металлургии и 12 миллиардов – цветной металлургии. Переработка их традиционными методами требует 2–3 раза больше энергии чем обработка «богатого» сырья. Опытные испытания плавильного агрегата «реактор инверсии фаз-вращающаяся печь-воздухоподогреватель» по восстановлению цинка из шлаков показали, что удельный расход энергии в 2–3 раза ниже, а удельная производительность в 3–4 раза выше чем в существующих аналогах.

Недостатком агрегата является: 1) перегрев шлака на разгрузочном конце печи, что может привести к плавлению шлака, окомкованию и нарушению режима работы установки; 2) невысокая температура отходящих газов вращающейся печи, перед воздухоподогревателем, что требует применение кислорода для плавки. Данный недостаток был устранен применением способа термохимической обработки отходящих газов реактора дополнительной порцией природного газа и дожиганием искусственного газа перед воздухоподогревателем. В итоге предложена термодинамическая модель расчета и экспериментально подтверждена возможность преобразования высокотемпературных отходящих газов плавильного реактора в искусственный газ; установлено, что введение режима химической

регенерации газов создает благоприятное условие, как для снижения перегрева шлака в разгрузочном конце вращающейся печи, так и для повышения температуры дутьевого воздуха до необходимого уровня, позволяющего отказаться от применения кислорода.

Ключевые слова: термодинамическая модель расчета, реактор инверсии фаз, фьюминг-шлак, цинк, искусственный газ.

Введение

Разрабатываемый авторами агрегат «реактор инверсии фаз – вращающаяся печь» является энергосберегающим видом плавильного оборудования для переработки техногенных отходов с низким содержанием цинка и других цветных, черных и редких металлов [1-6]. Несмотря на ряд достоинств этот агрегат имеет следующие недостатки: перегрев и окомкование шлака в месте сопряжения вращающейся печи с реактором, связанный высокой интенсивностью теплообмена между нагретым шлаком и высокотемпературным, закрученным потоком реакторных газов; вынужденное применение кислорода в процессе плавки, в результате остывание газов во вращающейся печи, ведущий к недостаточному нагреву окислителя в воздухоподогревателе (ВЗП), 280-3200С, вместо требуемого ,

Методы, оборудование и материалы

Методом для устранения этих недостатков выбран термодинамическая регенерация отходящих газов (ОГ) высокотемпературных установок, заключающийся в превращении физической теплоты ОГ в химически связанную энергию путем газификации недефицитных для данной местности топлива (уголь, мазут, природный газ и т.д.). В результате химической регенерации получается искусственный газ (ИГ) подобно водяному генераторному газу [7-9]. В разных источниках исследований этот процесс имеет разные наименования, как например, эндотермическая переработка дополнительного топлива на отходящих газах, химическая регенерация отходящих газов, энергохимическая аккумуляция газов (ЭХА). Для дальнейшей работы принято последнее название процесса – ЭХА. Эксперименты проводились на пилотной установке ТОО «Отрар» производительностью по шлаку 1,5 т/ч (см. рис. 1,2). Установка снабжена контрольно-измерительными приборами для регистрации технологических параметров процесса. Материалом для исследования принят малоцинковистый шлак фьюминговой плавки и природный газ месторождения Газли (Узбекистан). Исходный состав шлака в масс. %: ZnO (3,5-4,0); PbO (0,1 – 0,15); Cu (0,6 -0,8); FeO (7-8); Fe₂O₃ (2-3); Fe₃O₄ (23-24); SiO₂ (27-28); CaO (13-14); Al₂O₃ (7-9); S(0,4-0,5).



Рисунок 1 – Общий вид пилотной установки

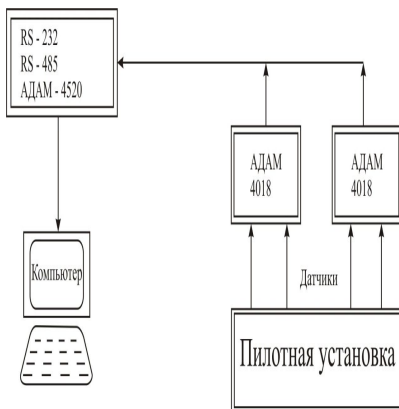


Рисунок 2 – Схема регистрации технологических параметров пилотной установки на основе контроллеров серии АДАМ - 4000

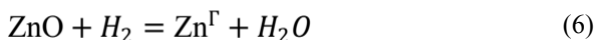
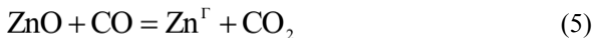
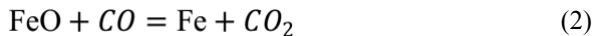
Разработка термодинамической модели расчета энергохимической аккумуляции газов.

Оценка эффективности преобразования отходящих реакторных газов в искусственное топливо требует проведения термодинамических расчетов процесса ЭХА с учетом восстановления цинка из расплава в плавильном реакторе. С этой целью вычисляют состав отходящих реакторных газов базируясь на следующей упрощенной физико-химической модели процесса в слое расплава: в газовой фазе и на границе газ-шлак равновесие устанавливается мгновенно; продукты сгорания топлива при входе в слой мгновенно охлаждаются до температуры расплава; в исходных продуктах сгорания в слое расплава содержатся H_2 , H_2O , CO , CO_2 , N_2 , а в конечных газовых продуктах энергохимической аккумуляции к ним добавляется парообразный цинк $-Zn^T$, что справедливо для процесса переработки шлаков происходящего при температуре ниже $1600\text{ }^\circ\text{C}$.

Последнее условие позволяет определить состав продуктов сгорания по равновесию только одной реакций:



Проходя сквозь слой цинксодержащего расплава газы взаимодействуют с окисью железа и окисью цинка по следующим реакциям:



Особенностью восстановления цинка из шлаковых расплавов продуктами конверсии природного газа является слабое развитие реакции (2), с образованием металлического железа, которое в условиях слоя инверсии фаз успевает расходоваться по реакции (4). В этих условиях процесс характеризуется преимущественно протеканием реакции (5), которая находится в диффузионной области реагирования. Поэтому в качестве расчетной принимается реакции (1) и (5), для которых константа равновесия и температурная зависимость константы равновесия предложенная в (10) записываются в следующем виде:

$$K = y \cdot w / x \cdot q, \quad (7)$$

$$K = 10 \exp\left(-\frac{1640}{T} + 1,5\right), \quad (8)$$

Здесь: x, y, w, q - число молей $\text{CO}_2, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2$ в отходящих реакторных газах на один моль исходного природного газа (например, моль CO_2 /моль природного газа).

Из материального баланса для углерода, водорода и кислорода, с учетом восстановленного из расплава цинка, выводим систему для определения состава отходящих реакторных газов перед камерой ЭХА, [11]:

$$x + y = B; \quad q + w = C; \quad x + 0,5(w + y - Z) = E \quad (9)$$

Здесь: B, C – число молей углерода, водорода в природном газе, E – число молей кислорода в окислителе, Z – число молей ZnO вступившее в реакцию на один моль природного газа.

Из совместного решения уравнений (7) и (8) получим систему:

$$(K - 1)x^2 + [K(B + C - Z - 2E) + Z + 2E]x - B(2E + Z - B) = 0;$$

$$y = B - x; w = Z + 2E - B - x; q = c - w; \quad (10)$$

Суммарное число молей полученных продуктов:

$D = A + B + C$, здесь A – число молей азота вступившего в реакцию.

где: $A = \alpha\beta\Sigma \left(m + \frac{n}{4}\right) C_m H_n + m_{N_2}^0$; $B = \Sigma(m) C_m H_n + m_{CO_2}^0$;

$$C = \Sigma \left(\frac{n}{2}\right) C_m H_n + d\alpha(1 + \beta)\Sigma \left(m + \frac{n}{4}\right) C_m H_n;$$

$$E = \alpha\Sigma \left(m + \frac{n}{4}\right) C_m H_n + m_{CO_2}^0 + 0,5d\alpha(1 + \beta) \cdot \Sigma \left(m + \frac{n}{4}\right) C_m H_n; \quad (11)$$

Здесь: $C_m H_n - CH_4, C_2H_6, C_3H_8$ и т.д., $m_{N_2}^0, m_{CO_2}^0$ – число молей азота и углекислого газа поступившие с природным газом, α – коэффициент расхода окислителя, β – отношение мольных долей азота и кислорода в окислителе, d – влагосодержание одного моля окислителя.

В (12) выведена эмпирическая зависимость расхода топлива от технологических параметров плавки шлаков в реакторе. Предварительно задаваясь температурой процесса, при заданном значении производительности реактора $P_{ин}$, совместно решая уравнения (9) и (11) определяют число молей «Z» и расход топлива на процесс «B»:

$$B = \frac{P_{ин}[C_{ш}(t_p - t_{ш}) + q_{нл} + q_{энд} - (\Delta C_Z + \Delta C_f)c_{ш}t_{ш}] + F_{OC} \cdot q_{OC}}{Q_H^P + \alpha v_6^0 c_6 t_6 - (D + Z)c_{O_2} t_{O_2} - [CO \cdot q_{CO} + H_2 q_{H_2} + Z \cdot q_{Zn}]}, \quad (12)$$

Здесь: F_{OC} – огневая поверхность реактора, $P_{ин}$ – расход шлака на реактор, $C_{ш}$ – удельная теплоемкость шлака, $t_{ш}$ – температура шлака поступающего в реактор, t_p – температура расплава на выходе из реактора, $q_{нл}$ – теплота плавления шлака, $q_{энд}$ – теплота эндотермической реакции восстановления цинка из шлаков, q_{CO}, q_{H_2}, q_{Zn} – теплота сгорания (окисления) CO, H₂ и Zn, q_{OC} – удельный тепловой поток через ограждающую поверхность реактора, ΔC_Z – концентрация цинка в шлаке, Q_H^P – низшая теплота сгорания природного газа, α – коэффициент расхода окислителя, v_6^0 – теоретический необходимый удельный расход окислителя, c_6 – удельная теплоемкость окислителя, t_6 – температура окислителя, c_{O_2}, t_{O_2} – теплоемкость и температура отходящих газов с реактора.

Процесс ЭХА газов характеризуется вводом дополнительного количества природного газа в поток высокотемпературных реакторных газов. В физико-

химическом смысле расчет ЭХА представляет собой задачу обратную процессу неполного горения природного газа и сводится к определению конечной температуры, состава и основных топливных характеристик полученного искусственного газа.

$$y_1 + x_1 = y + x + \Delta B = B + \Delta B = B_1;$$

$$q_1 + w_1 = q + w + \Delta C = C + \Delta C = C_1;$$

$$x_1 + 0,5(y_1 + w_1) = x + 0,5(y + w) + \Delta E = E + \Delta E = E_1; \quad A_1 = A \quad (13)$$

Здесь x_1, y_1, w_1, q_1 – число молей $\text{CO}_2, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}$ и H_2 , соответственно, в уходящих газах камеры ЭХА. $\Delta B, \Delta C, \Delta E$ – число молей углерода, водорода и кислорода дополнительно введенного в процесс ЭХА природным газом. Принимая во внимание, что в отходящих реакторных газах цинк находится в парообразном виде, Zn^r для дальнейших расчетов значение «Z» (число молей ZnO) считаем равной нулю.

Задавая температурой процесса ЭХА, T_1 , значениями $\Delta B, \Delta C, \Delta E$ при $Z = 0$, из совместного решения уравнений (7), (9) находят число молей x_1, y_1, w_1, q_1 в уходящих газах реактора ЭХА.

Проверку правильности решения производят по тепловому балансу камеры ЭХА, (13), затем определяют топливные характеристики полученного искусственного газа по известной методике.

Тепловой баланс камеры ЭХА:

$$Q_{\text{ог}}^x + Q_{\text{ог}}^{\phi} + \Delta Q_{\text{прг}}^x + \Delta Q_{\text{прг}}^{\phi} + Q_{\text{ун}}^{\text{РИФ}} = Q_{\text{уг}}^x + Q_{\text{уг}}^{\phi} + Q_{\text{ш}} + Q_{\text{ос}}^{\text{ЭХА}} + Q_{\text{ун}}^{\text{ЭХА}}, \quad (14)$$

Здесь: $Q_{\text{ог}}^x, Q_{\text{ог}}^{\phi}, Q_{\text{уг}}^x, Q_{\text{уг}}^{\phi}$ – химическая и физическая теплота отходящих газов реактора и уходящих газов камеры ЭХА, соответственно, $Q_{\text{ш}}$ – теплота нагрева шлака в камере ЭХА, $\Delta Q_{\text{прг}}^x, \Delta Q_{\text{прг}}^{\phi}$ – химическая и физическая теплота дополнительно введенного природного газа; $Q_{\text{ос}}^{\text{ЭХА}}$ – потери теплоты в окружающую среду через футеровку реактора ЭХА. $Q_{\text{ун}}^{\text{РИФ}}, Q_{\text{ун}}^{\text{ЭХА}}$ – теплота уноса реактора и камеры ЭХА.

Результаты расчетов и экспериментов.

Результаты расчетов для режима в плавильном реакторе для $\alpha=0,782$ и $t_{\text{ог}}^{\text{ЭХА}} = 1300^{\circ}\text{C}$ приведены в таблице 1. На основе расчетатехнологических параметров плавки были проведены экспериментальные исследования высокотемпературной конверсии природного газа в потоке отходящих цинксодержащих газов реактора инверсии фаз на существующей пилотной установке (рисунок 3).

Вращающаяся печь пилотной установки состоит из двух жестко соединенных частей разных диаметров. Первая часть 2, по ходу реакторных газов, $\ell = 5,5$ м, $d_{\text{нар}}/d_{\text{вн}} = 1,4/0,88$ м, а вторая, 3 – $\ell = 3,5$ м, $d_{\text{нар}}/d_{\text{вн}} = 1,0/0,68$ м. Первая часть предназначалась для проведения ЭХА газов (камера ЭХА), вторая – для дожигания горючих газов ЭХА (камера дожигания). Подвод сжатого воздуха для дожигания ЭХА – газов, осуществлялся через водоохлаждаемую трубу 10. Дополнительный природный газ, через распределительный коллектор 6, подавался под углом 30° в обратном направлении к закрученному потоку реакторных газов. Шлак с бункеров подавался по трубе 7 в камеру дожигания трубчатой печи. Отбор проб шлака и газов производился через специальные отверстия в футеровке трубчатой печи во время кратковременной ее остановки. Для предотвращения подсоса воздуха в реактор ЭХА в системе поддерживался небольшое давление, $5 \sim 10$ мм.вод.ст.

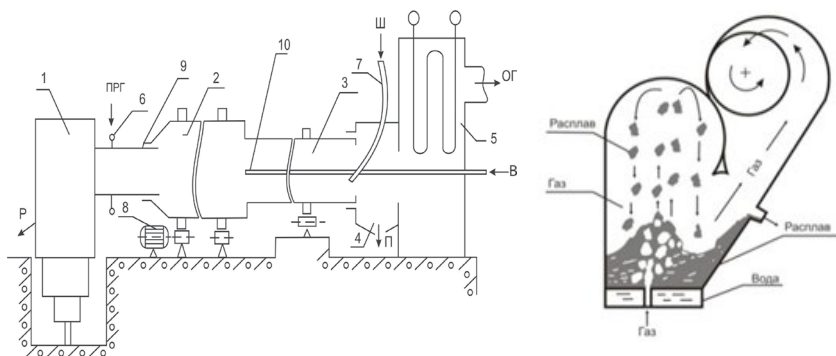


Рисунок 3 – Структурная схема пилотной установки и принципиальная схема реактора инверсии фаз.

1 – реактор инверсии фаз; 2 – реактор ЭХА (РЭХА); 3- камера дожигания (КД) ЭХА – газов; 4 – не футерованная пылевая камера (ПК); 5 – воздухоподогреватель (ВЗП); 6 – коллектор ввода дополнительного природного газа; 7 – шлакозагрузочная труба; 8 – привод трубчатой печи; 9 – уплотнение зазоров камеры ЭХА; 10 – водоохлаждаемая труба для подвода воздуха. ПРГ, В – природный газ и воздух, Ш, П – шлак и пыль, Р – расплав, ОГ – отходящие газы

Результаты экспериментов имели следующие характеристики:

– низшая теплота сгорания природного газа $Q_{\text{рн}} = 34618$ кДж/м³, теоретический расход воздуха $\nu_a^0 = 9,06$ нм³/нм³, коэффициент расхода окислителя в плавильной камере $\alpha = 0,782$;

– составы отходящих газов реактора на сухую массу показаны в таблице 1; парциальное давление паров цинка в ОГ РИФ не превышает 2–3 %;

– режимные показатели переработки шлака: $I_C/G_b = 0,43$; $t_{ш} = 850 - 900^0C$; $t_p = 1300 - 1350^0C$; $t_{ог}^P = 1400 - 1450^0C$; $t_{ог}^{ЭХА} = 1300 - 1100^0C$; $t_{ог}^{КД} = 500 - 850^0C$; $t_{ог}^{ВЗП} = 450 - 650^0C$; $B_{прг} = 250 - 260$ $нм^3/ч$; $V_g = 1350 - 1530$ $нм^3/ч$; $t_g = 300 - 550^0C$; $V_{O_2} = 120 - 20$ $нм^3/ч$; $P_p = 1300 - 1400$ $кг/ч$; $C_K = 1,2\%$; $E = 70\%$. $B_{прг}^{ЭХА} = 25 - 75$ $нм^3/ч$.

Здесь: I_C – скорость изменения импульса газов в соплах продувочной решетки плавильного реактора, G_b – вес ванны; $t_{ш}, t_p$ – температура шлака после трубчатой печи и реактора; $t_{ог}^P, t_{ог}^{ЭХА}, t_{ог}^{КД}, t_{ог}^{ВЗП}$ – температура отходящих газов после плавильного реактора, камеры ЭХА, камеры дожигания и ВЗП, соответственно; $B_{прг}, B_{прг}^{ЭХА}$ – расход природного газа на реактор и камеры ЭХА; V_g, V_{O_2} – расход дутьевого воздуха и кислорода; t_g – температура воздуха; P_p – производительность реактора по шлаку; C_K – конечное содержание цинка в расплаве; E – степень извлечение цинка.

Обсуждение результатов экспериментов.

На рисунке 4 и в таблице 1 показаны результаты расчетных и экспериментальных данных. Сравнение экспериментальных данных с расчетными показывают, что термодинамическую модель расчета можно применять во вновь разрабатываемых системах переработки цинк-содержащего сырья, для определения состава ЭХА – газов, с точностью до 10–15 %. С ростом соотношения в пределах $v_{прг}^{ЭХА} \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ исх. прг} = 0,1 - 0,25$ температура искусственных газов падает с 1280 до 1080 °С, а соотношение H_2/CO растет ~ 1,6 раза. Концентрации непрореагировавших CH_4 и O_2 не превышает 1,8 % и 1,6 %, соответственно. В таком режиме процесс трансформации физического тепла отходящих газов в химическую энергию искусственных газов заканчивается в пределах камеры ЭХА.

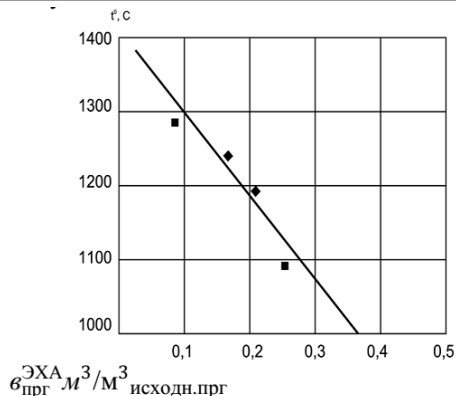


Рисунок 4 – Зависимость температуры ЭХА – газов от удельного расхода природного газа на регенерацию. Линия – расчетные данные, квадратные точки – экспериментальные данные; $\frac{V_{\text{ЭХА}}}{V_{\text{исх.прг}}}$ – отношение расхода природного газа на процесс ЭХА к его исходному количеству поступившему в плавильный реактор

Таблица 1 – Составы газов на выходе из реактора ЭХА, в % на сухую массу. Эксперимент/ расчет

№ опыта	$\frac{V_{\text{ЭХА}}}{V_{\text{исх.прг}}}$	H_2	CO	CO_2	CH_4	N_2	O_2
1	0,1	10,0	9,6	7,4	0,78	70,1	1,2
	0,1	8,70	7,82	8,8	0,0	73,5	0,0
2	0,15	11,6	10,5	6,25	1,80	68,0	1,6
	0,15	12,40	9,3	7,9	0,0	69,8	0,0
3	0,2	16,4	9,4	5,4	1,1	65,5	1,2
	0,2	13,8	9,6	7,7	0,0	67,1	0,0
4	0,25	16,8	10,4	6,6	1,0	63,1	1,25
	0,25	14,4	9,8	7,6	0,0	66,4	0,0

При работе пилотной установки в обычном режиме шлак на выходе из трубчатой печи перегревался, до 950–1000 °С, что приводил к его окомкованию и как следствие к неплановым остановкам установки. В то же время, за счет охлаждения реакторных газов во вращающейся печи, температура подогрева дутья в ВЗП не поднималась выше 300 °С, что вынуждала применения обогащенного до 26–28 % кислородом воздуха. С введением режима ЭХА перегрев шлака на разгрузочном конце вращающейся печи снизился до 850–900 °С, что приостановило окомкование шлака. За счет дожигания ЭХА-газов перед ВЗП температуровоздушного дутья поднималась до 500–550 °С, что создала возможность снизить расход кислорода с 120 нм³/ч до 20 нм³/ч.

Рисунок 5 демонстрирует характер изменения температур компонентов плавки в пилотной установке.

Одной из причин недостижения температуры нагрева окислителя в ВЗП до 600°C являлся остывание газов в пылевой камере неизолированным металлическим корпусом. Для будущих установок можно рекомендовать конструкцию без пылевой камеры, так как свободное пространство под ширмами ВЗП может заменить ее. В таком случае можно достичь температуру нагрева дутья в ВЗП до $t \geq 600^{\circ}\text{C}$, таким образом исключить из системы применение кислорода.

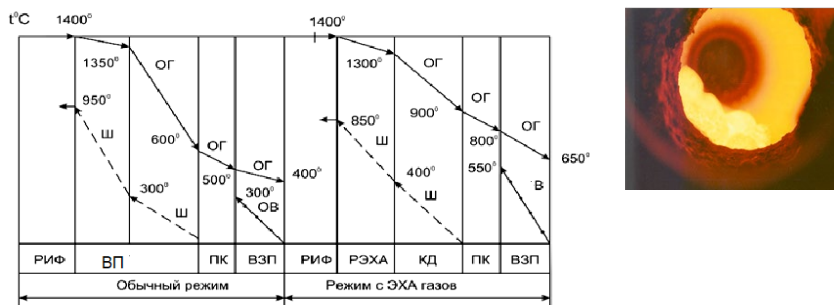


Рисунок 5 – Изменение температурного графика процесса переработки отвального шлака с применением ЭХА газов в режиме $\alpha_{\text{прг}}^{\text{ЭХА}} = 0,1$ и картина образования комков во вращающейся печи.

ОГ – отходящие газы, ОВ, В – обогащенный кислородом дутьевой воздух, воздух, Ш – шлак, РИФ – реактор инверсии фаз, ВП – вращающаяся печь, ПК – пылевая камера, КД – камера дожигания ЭХА – газов, РЭХА – реактор ЭХА, ВЗП – воздухоподогреватель

Источники финансирования и признательность

Совместно с ТОО «ОТРАР», при софинансировании РГП «НЦ Комплексная переработка минерального сырья» и Британской компанией «ZincOx» был создан пилотная установка (ПУ) производительностью 1,5 т/ч и проведены эксперименты на 400 тоннах отвальных шлаках. Общая сумма инвестиции составила ~700 000\$ США, при долевом участии партнеров – 0,09:0,19:0,72 соответственно.

Авторы выражают признательность генеральному директору РГП «НЦ КПМС» Жарменову А. А., президенту компании «ZincOx» Ноелу Массону и заведующему лабораторией тяжелых цветных металлов Тельбаеву С. А. за оказанную финансовую и технологическую помощь в проведении экспериментов.

Выводы

1 Разработана термодинамическая модель расчета трансформации физического тепла отходящих газов плавильного реактора в химическую энергию искусственного газа, учитывающий технологические параметры процесса плавки, названной энергохимической аккумуляцией (ЭХА).

2 Экспериментально подтверждена возможность регенерации высокотемпературных отходящих газов плавильного реактора в виде искусственного газа; суммарная удельная теплота горячих ЭХА-газов (физическая и химическая) при $v_{\text{прг}}^{\text{ЭХА}} \cdot \text{м}^3/\text{м}^3_{\text{исх.прг}} = 0,25$ составляет $q_{\Sigma\text{эха}} \sim 6500$ кДж/м³прг, что позволяет использовать его в среднетемпературных процессах, например для подогрева воздуха.

3 Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывают, что термодинамическую модель расчета можно применять для определения состава искусственных газов с точностью до 10–15 %, во вновь разрабатываемых системах переработки цинк-содержащих шлаков.

4 Установлено, что введение режима энергохимической аккумуляции при $v_{\text{прг}}^{\text{ЭХА}} \cdot \text{м}^3/\text{м}^3_{\text{исх.прг}} = 0,1$ снижает температуру шлака на разгрузочном конце вращающейся печи с 950–1000 °С до 850–900 °С и повышает нагрев дутьевого воздуха с 280–300 °С до 500–550 °С, что устраняет окомкование шлака и позволяет сократить расход кислорода почти в шесть раз, с 120 до 20 м³/ч.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Dikhanbaev, B. I., Chandima, G., Dikhanbaev, A. B.** Energy-saving method for technogenic waste processing // Journal PLoS ONE 12(12): e0187790. – San Francisco, California, USA. December 27, 2017. – P. 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187790>

2 **Dikhanbaev, B. I., Chandima, G., Dikhanbaev, A. B., Ibray, S.** Development of hydrogen-enriched water gas production technology by processing Ekibastuz coal with technogenic waste // Arcive of mechanical engineering. – Vol. LXV. – 2018. – № 2. – Warszawa, Republic Polska. – doi: 10.24425/123022. [Electronic resource]. – <http://journals.pan.pl/dlibra/journal/97806>.

3 **Рахматулина, А. К., Жумабекова, А. Ж., Диханбаев, А. Б.** Инновационный патент 31572 на изобретение. Способ переработки цинксодержащих шлаков шахтной плавки // Республика Казахстан. опубл. 30.09.2016, бюл. №12. – 4 с. :ил

4 **Диханбаев А. Б., Диханбаев, Б.** Разработка энергосберегающего способа для переработки техногенных отходов // Комплексное использование минерального сырья. – Алматы, 2019. – № 4. – С. 82–92. [Электронный ресурс]. – www.kims-imio.kz

5 **Такежанов, С. Т., Абдеев, М. А., Юсупов А. Н. и др.** Комплексная переработка твердых шлаков свинцовой шахтной плавки. // Ин-т Цветметинформация. – М., 2000. – С.3–5.

6 **Панфилов, П. Ф., Полынская, А. М., Онаев, И. А., Цефт, А. Л., Шумаков, В. В.** Обеднение отвалных шлаков свинцовых заводов карбидом кальция // Ин-т Цветметинформация. – М., 1999. – С. 39–58.

7 **Иванов, Н. И., Гольденберг, И. Б., Литвинов, В. К.** Оптимизация теплоэнергетической системы промпредприятий на основе химической регенерации дымовых газов промышленных печей.// Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции «Проблемы энергетики теплотехнологий». Т. 1. – М., 1983. – С. 80–81.

8 **Юрнев, В. Н., Зубарев, А. В., Алексеев, В. П.** Экспериментальные исследования дожигаания газов с низким содержанием горючих компонентов. // Труды Моск. энерг. ин-та. Выпуск 476. – 2000. – С. 82–85.

9 **Окунев, А. Н., Костьяновский, Н. А., Донченко, П. А.** Фьюмингование шлаков. – М. : Metallurgia, 1966. – С. 149.

10 **Диханбаев, Б., Диханбаев, А. Б.** Расчет параметров кипящего слоя расплава для фьюмингования свинцовых шлаков // Труды Международной конференции «Перспективные направления развития химии и химической технологии». – Т. 2. – Шымкент, 1999. – С. 134–136.

11 **Диханбаев, Б.** К расчету характеристик искусственного газа, вырабатываемого из тепловых отходов реактора кипящего слоя расплава // Труды Республиканской научно-практической конференции «Теория и практика интенсификации ресурсо-энергосбережения в химической технологии и металлургии». – Шымкент-Алматы, 2000. – С. 107–109.

REFERENCES

1 **Dikhanbaev, B. I., Chandima, G., Dikhanbaev, A. B.** Energy-saving method for technogenic waste processing // Journal PLoS ONE 12(12): e0187790. – San Francisco, California, USA. December 27, 2017. – P. 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187790>

2 **Dikhanbaev, B. I., Chandima, G., Dikhanbaev, A. B., Ibray, S.** Development of hydrogen-enriched water gas production technology by processing ekibastuz coal with technogenic waste // Arcive of mechanical engineering. – Vol. LXV. – 2018. – № 2. – Warszawa, Republic Polska. – doi: 10.24425/123022. [Electronic resource]. – <http://journals.pan.pl/dlibra/journal/97806>

3 **Rakhmatulina, A. K., Zhumabekova, A. Zh., Dikhanbaev, A. B.** Innovatsionnyi patent 31572 na izobretenie. Sposob pererabotki tsinksoderzhashchikh shlakov shakhtnoi pлавки [Innovative patent 31572 for invention. Method for processing

zinc-containing slag from mine smelting] // Respublika Kazakhstan. Published 30.09.2016. – bul. №12–4 s. : il

4 **Dikhanbaev, A. B., Dikhanbaev, B.** Razrabotka energosberegaiushchego sposoba dlia pererabotki tekhnogennykh otkhodov [Development of an energy-saving method for processing industrial waste]// Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syria. –Almaty. 2019, № 4. p.82-92. [Electronic resource]. – www.kims-imio.kz

5 **Takezhanov, S. T., Abdeev, M. A., Iusupov, A. N. i dr.** Kompleksnaia pererabotka tverdykh shlakov svintsovoi shakhtnoi plavki [Complex processing of solid slag from lead mine smelting] // In-t Tsvetmetinformatsiia. – M., 2000. – P. 3–5.

6 **Panfilov, P. F., Polynskaia, A. M., Onaev, I. A., Tseft, A. L., Shumakov, V. V.** Obednenie otvalnykh shlakov svintsovykh zavodov karbidom kaltsiia [Depletion of dump slags from lead plants with calcium carbide] // In-t Tsvetmetinformatsiia. – M., 1999. – P. 39–58.

7 **Ivanov, N. I., Goldenberg, I. B., Litvinov, V. K.** Optimizatsiia teploenergeticheskoi sistemy prompredpriiatii na osnove khimicheskoi regeneratsii dymovykh gazov promyshlennykh pechei [Optimization of the heat power system of industrial enterprises on the basis of chemical regeneration of flue gases of industrial furnaces] // Tezisy dokladov Vsesoiuznoi nauchnoi konferentsii «Problemy energetiki teplotekhnologii». Vol 1. – M., 1983. – P. 80–81.

8 **Iurenev, V. N., Zubarev, A. V., Alekseev, V. P.** Eksperimentalnye issledovaniia dozhiganiia gazov s nizkim sodержaniem goriuchikh komponentov. [Experimental studies of the afterburning of gases with a low content of combustible components] // Trudy Mosk.energ.in-ta. Issue 476. – 2000. – P. 82–85.

9 **Okunev, A. N., Kostianovskii, N. A., Dongenko, P. A.** Fiumingovanie shlakov. [Slag fuming] – Moscow : Metallurgiiia, 1966. – P. 149.

10 **Dikhanbaev, B., Dikhanbaev, A. B.** Raschet parametrov kipiashchego sloia rasplava dlia fiumingovaniia svintsovykh shlakov [Calculation of the parameters of a fluidized bed of a melt for fuming lead slag] // Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii «Perspektivnye napravleniia razvitiia khimii i khimicheskoi tekhnologii». – Vol. 2. – Shymkent, 1999. – P. 134–136.

11 **Dikhanbaev, B. K.** Raschetu kharakteristik iskusstvennogo gaza, vyrabatyvaemogo iz teplovykh otkhodov reaktora kipiashchego sloia rasplava [Calculation of the characteristics of artificial gas produced from thermal waste of a fluidized bed reactor] // Trudy Respublikanskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Teoriia i praktika intensivatsii resurso-energoberezeniia v khimicheskoi tekhnologii i metallurgii». – Shymkent-Almaty. 2000. – P. 107–109.

Материал поступил в редакцию 28.02.22.

*А. Б. Диханбаев¹, Б. И. Диханбаев², М. Б. Кошумбаев³, С. Б. Ыбрай⁴

¹Ғ. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

^{2,3}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ.;

⁴Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

Материал 28.02.22 баспаға түсті.

ФАЗАЛЫҚ ИНВЕРСИЯЛЫҚ РЕАКТОРДЫҢ ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ГАЗДАРЫН ЖАСАНДЫ ГАЗҒА АЙНАЛДЫРУ МӘСЕЛЕСІНЕ

Металлургиялық кәсіпорындардың үйінділерінде 20 миллиард тоннаға жуық өндірістік қалдықтар жиналды, оның 8 миллиарды қара металлургияның, 12 миллиарды түсті металлургияның шлактары. Оларды дәстүрлі әдістермен өңдеу «бай» шикізатты өңдеуге қарағанда 2–3 есе көп энергияны қажет етеді. «Реактор фазасы-айналмалы пеш-ауа жылытқышы» балқыту қондырғысының шлактан мырыш алу үшін жүргізілген тәжірибелік сынаулары энергияның меншікті шығыны бар аналогтармен салыстырғанда 2–3 есе төмен, ал меншікті өнімділік 3–4 есе жоғары екенін көрсетті. Қондырғының кемшілігі: 1) пештің ағызу ұшында қождың қызып кетуі, бұл қождың еруіне, түйіршіктелуіне және қондырғының режимінің бұзылуына әкелуі мүмкін; 2) балқыту үшін оттегі пайдалануды қажет ететін ауа қыздырғышқа дейін айналмалы пештің пайдаланылған газдарының төмен температурасы. Бұл кемшілік реактордың пайдаланылған газдарын табиғи газдың қосымша бөлігімен термохимиялық өңдеу әдісін қолдану және ауа қыздырғыштың алдында жасанды газды жасау арқылы жойылды. Нәтижесінде термодинамикалық есептеу моделі ұсынылды және балқыту реакторынан жоғары температуралы пайдаланылған газдарды жасанды газға айналдыру мүмкіндігі тәжірибе жүзінде расталды; газды химиялық регенерациялау режимін енгізу айналмалы пештің ағызу ұшында қождың қызып кетуін азайту үшін де, үрлеу ауасының температурасын қажетті деңгейге дейін көтеру үшін де қолайлы жағдай тудыратыны анықталды, бұл оттегі пайдалануды шектеді.

Кілтті сөздер: есептеудің термодинамикалық моделі, инверсиялық фаза реакторы, фьюминг-қож, мырыш, жасанды газ.

*A. B. Dikhanbaev¹, B. I. Dikhanbaev², M. B. Koshumbaev³, S. B. Ybray⁴

¹G. Daukeev Almaty University of Power Engineering and Communications, Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{2,3}S. Seifullin Kazakh AgroTechnical University, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan;

⁴D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.

Material received on 28.02.22.

TO THE ISSUE OF CONVERTING WASTE GASES OF A REACTOR INVERSION PHASE INTO ARTIFICIAL GAS

In dumps of metallurgical enterprises, about 20 billion tons of industrial waste have been accumulated, of which 8 billion are slags from ferrous metallurgy and 12 billion from non-ferrous metallurgy. Processing them by traditional methods requires 2–3 times more energy than processing «rich» raw materials. Experimental tests of the melting unit « reactor phase-rotary kiln-air heater» for the recovery of zinc from slag showed that the specific energy consumption is 2–3 times lower, and the specific productivity is 3–4 times higher than in existing analogues. The disadvantage of the unit is: 1) overheating of the slag at the discharge end of the furnace, which can lead to slag melting, pelletization and disruption of the regime in the installation; 2) the low temperature of the exhaust gases of the rotary kiln, before the air heater, which requires the use of oxygen for melting. This drawback was eliminated by using the method of thermochemical treatment of the reactor off-gases with an additional portion of natural gas and afterburning artificial gas in front of the air heater. As a result, a thermodynamic calculation model was proposed and the possibility of converting high-temperature exhaust gases from a smelter into artificial gas was experimentally confirmed. It has been established that the introduction of the regime of chemical gas regeneration creates a favorable condition both for reducing slag overheating at the discharge end of the rotary kiln and for increasing the temperature of the blast air to the required level, which makes it possible to refuse the use of oxygen.

Keywords: thermodynamic calculation model, reactor inversion phase, fuming slag, zinc, artificial gas.

Теруге 28.02.2022 ж. жіберілді. Басуға 18.03.2022 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

3,77 Мб RAM

Шартты баспа табағы 13,12. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: З. С. Исакова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3883

Сдано в набор 28.02.2022 г. Подписано в печать 18.03.2022 г.

Электронное издание

3,77 Мб RAM

Усл. печ. л. 13,12. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: З. С. Исакова

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 3883

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

8 (7182) 67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz