

УДК 669.162.1

**Мних Антон Сергійович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та енергетичного менеджменту. Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя, Україна; пр. Леніна, 226; 066 184-64-98; [mnikh.anton@gmail.com](mailto:mnikh.anton@gmail.com); (<https://orcid.org/0000-0001-5421-9778>).

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ ПРОЦЕСУ СПІКАННЯ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ АГЛОМЕРАТУ

*Проведено перевірку результатів теоретичного аналізу динаміки процесу формування шару, при застосуванні складного двохступінчатого лотку, на тепловий режим й продуктивність процесу агломерації. методом активного експерименту, на опитному лабораторному комплексі МК «Запоріжсталь». Результати експерименту свідчать, про покращення сегрегаційних процесів у шарі, зменшенні виходу дрібноти. підвищенні продуктивності процесу, скороченні споживання твердого палива.*

**Ключові слова:** сегрегація, шихта, горизонт шару, тепловий режим.

**Мных Антон Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехники и энергетического менеджмента. Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье, Украина; пр. Ленина, 226; 066 184-64-98; [mnikh.anton@gmail.com](mailto:mnikh.anton@gmail.com); (<https://orcid.org/0000-0001-5421-9778>).

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ АГЛОМЕРАТА

*Проведена проверка результатов теоретического анализа динамики процесса формирования слоя, при использовании составного двухступенчатого лотка, на тепловой режим и производительность процесса агломерации, методом активного эксперимента, на опытном лабораторном комплексе МК «Запорожсталь». Результаты эксперимента свидетельствуют, об улучшении сегрегационных процессов в слое, уменьшении выхода мелочи, повышении производительности процесса, сокращении потребления твердого топлива.*

**Ключевые слова:** сегрегація, шихта, горизонт слоя, тепловой режим.

**Mnyh Anton Sergeevich**, Cand. Sc. (Eng.), As. prof. The department of electrical engineering and energy management. Zaporozhye state engineering Academy, Lenina 226, Zaporozhye, Ukraine; 066 184-64-98; [mnikh.anton@gmail.com](mailto:mnikh.anton@gmail.com); (<https://orcid.org/0000-0001-5421-9778>).

### RESEARCH OF THERMAL REGIME INFLUENCE OF THE SINTERING PROCESS ON THE PERFORMANCE INDICATORS OF AGGLOMERATE

*The current state of thermal regime research of sintering process has been reviewed in this work. The solution of the problem providing the required segregation of material fractions and as a result of solid fuel according the layer height, which in the author's opinion, will provide an opportunity to align the thermal regime of cross section for the sintered material, thereby reducing the fine output and improve the process performance.*

*Test verification of theoretical analysis of the process dynamics of a layer formation using a two-stage composite tray on thermal condition and the agglomeration process performance by the method of active experiment at the experimental laboratory complex MK "Zaporizhstal" has been done.*

*According to the experiment results there was made a conclusion about improvement of segregation processes in a layer, reduction of the fine output, productivity improvement of the process, reduction of solid fuel use.*

**Key words:** segregation, charge, horizon layer, thermal regime.

### Введение

Обеспечение высокой производительности и экономичности агломерационного передела с учетом сохранения качества продукта по физико-химическим показателям является основной задачей современной технологии агломерации.

Основные мероприятия, направленные на повышение производительности аглофабрик, работающих на шихте с высоким содержанием концентратов, базировались на повышении высоты спекаемого слоя. Это позволило, в некоторой степени, снизить расход твердого топлива, однако последнее часто влекло за собой некоторое снижение производительности агломашин при неизменном содержании мелочи в агломерате.

Высокий выход мелочи при грохочении спека, вызван неудовлетворительной подготовкой шихты, нарушениями при ее укладке на паллеты агломашин, что влечет за собой отсутствие либо недостаточную сегрегацию материала по высоте слоя, тем самым

обуславливая неравномерность теплового режима по сечению пирога. Полученный в результате недостаток тепла в верхних и его переизбыток в нижних горизонтах значительно снижают производительность агломашины по годному.

Таким образом, решение задачи обеспечения требуемой сегрегации фракций материала, и как следствие твердого топлива, по высоте слоя, даст возможность выровнять тепловой режим по сечению спекаемого материала, тем самым сократить выход мелочи и повысить производительность процесса.

### **Анализ исследований и публикаций**

Исследованием и моделированием теплообмена в слоевых процессах посвящены работы Гольдфарба Э. М., Китаева Б. И. [1] и др.

Определению оптимального содержания твердого топлива в спекаемой шихте посвящены работы таких ученых, как Ефименко Г. Г., Коршиков Т. В., Петухов А. П. и др.

Оптимальное распределение топлива, позволяет достичь постоянства максимальной температуры в зоне горения при ее перемещении по высоте слоя спекаемой шихты, и как следствие, стабилизировать свойства агломерата по горизонтам спека.

В 1934 г. Вендеборн Г. впервые применил метод зональных тепловых балансов для описания тепловых процессов, протекающих в агломерируемом слое. Дальнейшее развитие указанный метод получил в работах Шурхала В. А., Сигова А. А., Братчикова С. Г. и др.

Уравнения зонального теплового баланса, полученные Вегманом Е. Ф., позволили значительно упростить расчеты по определению оптимального распределения топлива. В работах Петрушова С. Н. принимались попытки по усовершенствованию и упрощению указанного метода [2].

Петухов А. П. глубоко и подробно изучил вопросы сегрегации шихты и распределения твердого топлива по высоте слоя при различных способах загрузки агломашиной. Обобщив работы ряда исследователей, он предложил способ определения индекса сегрегации в простой и удобной форме при условии линейного распределения крупной фракции по высоте слоя.

В зарубежных публикациях [3–5], авторы с целью повышения энергоэффективности агломерационного процесса прибегают к повышению высоты слоя спекаемого материала, использованию альтернативных источников тепловой энергии, однако вопросы сегрегации материала с целью требуемого распределения топлива и химических компонентов ими не рассматриваются.

В последние годы, в связи с внедрением в агломерационном производстве технологии спекания агломерата в высоком слое, вопрос об организации укладки шихты с целью усиления сегрегации твердого топлива стал особенно важным. Кроме того, он усугубляется еще и тем, что существующие конструкции загрузочных устройств не позволяют, увеличивая слой, регулировать сегрегацию шихты и топлива.

### **Постановка задачи**

С целью стабилизации теплового режима процесса спекания агломерата, в работе [6], расчетным путем, получено оптимальное распределение твердого топлива и фракционного состава полидисперсной шихты по горизонтам слоя. В работе [7], предложено использование усовершенствованного узла загрузки материала в виде составного загрузочного лотка. Последнее, по результатам моделирования распределения фракционного состава шихты по высоте слоя, позволит максимально приблизиться к условиям требуемой сегрегации фракций шихты и твердого топлива.

Целью работы является проверка результатов теоретического анализа динамики процесса формирования слоя, при использовании составного двухступенчатого лотка, на тепловой режим и производительность процесса агломерации.

### **Изложение результатов исследования**

Анализ эффективности предложенных мероприятий по усилению сегрегационных процессов в слое загружаемого материала, за счет использования загрузочного лотка

предложенной конструкции, проведен методом активного эксперимента, на «Опытной установке аглоцеха для спекания агломерата» МК «Запорожсталь», рис. 1.



Рис. 1. Опытная установка аглоцеха для спекания агломерата

Рис. 2. Лабораторный окомкователь

Агломерационная шихта, состав которой приведен в табл. 1, увлажнялась до 8,5 % и окомковывалась в лабораторном окомкователе, рис. 2, диаметром 0,8 м. Окомкованная шихта рассеивалась на фракции +12 мм, 12–8 мм, 8–5 мм, 5–3 мм, 3–1 мм, –1 мм, которыми в определенной последовательности, рис. 3, заполнялась спекательная чаша.

Таблица 1

Компонентный состав шихты для условий МК «Запорожсталь»

№	Компонент	кг/т	%
1	Концентрат	478	47,8
2	Аглоруда	282	28,2
3	Известняк	129	12,9
4	Известь	21	2,1
5	Шлам	15	1,5
6	Пыль колошник	13	1,3
7	Отсев агломерата	29	2,9
8	Шлак металлургический	8	0,8
9	Топливо	33	3,3

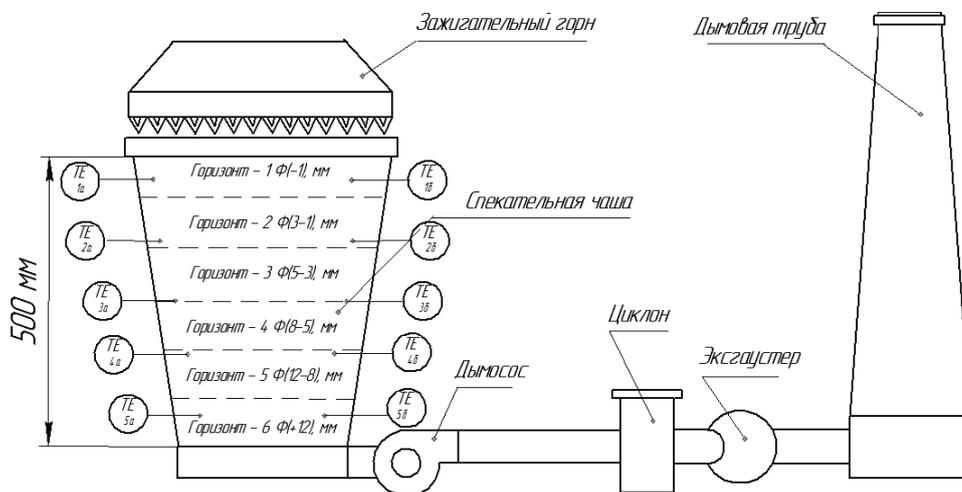


Рис. 3. Схема лабораторной установки. ТЕ – термомпара

Заполнение чаши проводилось согласно расчетной зависимости изменения среднего диаметра частиц шихты по горизонтам слоя, при условии использования составного загрузочного лотка, представленной в [7].

Распределение топлива и основности, при указанном способе загрузки приведены на рис. 4. Общее содержание топлива в шихте составляло 3,3%, и закономерность его распределения максимально приближена к результатам теоретического расчета оптимального распределения твердого топлива по горизонтам слоя [6].

Высота слоя загружаемого материала составляла 500 мм, что соответствует условиям работы агломашины № 1 предприятия.

Зажигание шихты производилось в течении одной минуты, удельный расход воздуха и газа соответствовал условиям работы горна агломашины. Температура зажигания шихты составляла примерно 1250–1300 °С. Во время спекания шихты непрерывно производилась регистрация температуры отходящих газов и разрежения под спекаемым слоем.

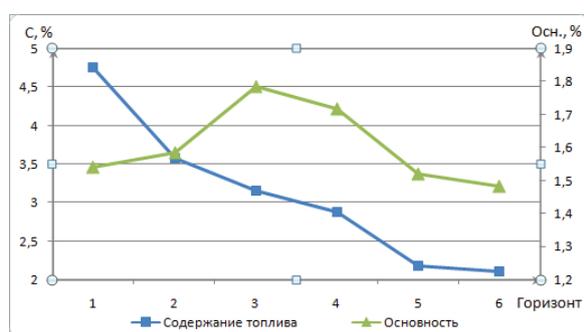


Рис. 4. Распределение топлива и основности в слое

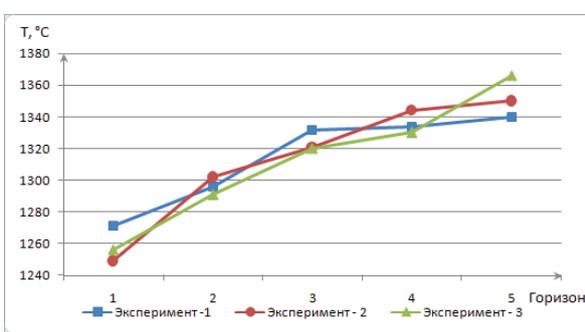


Рис. 5. Изменение температуры зоны горения

Измерение температуры зоны горения проводилось группой термопар по пяти горизонтам, результаты представлены на рис. 5. Из полученных результатов видно, что по горизонтам слоя удалось достичь стабилизации температуры в диапазоне 1250–1360 °С, что позволило исключить переоплавление нижних и недопек верхних горизонтов спекаемой шихты, и тем самым повысить выход годного.

После окончания процесса спекания, готовый агломерат проверялся на прочность и соответствие стандартам качества предприятия, согласно СТП 8.2-05-03. Испытания на механическую прочность проводились во вращающемся барабане, рис. 6., для чего проба массой 15 кг и крупностью 5–40 мм, предварительно дробилась в большой щековой дробилке, рис. 7, с последующим рассевом на сите с ячейками размером 5 мм и загружалась в барабан.



Рис. 6. – Лабораторный барабан



Рис. 7. – Большая щековая дробилка

Испытания агломерата заключались во вращении пробы в течении 8 минут в барабане (ДСТУ 3200-95) со скоростью  $(25 \pm 1)$  об/мин., после чего выгружаемая проба агломерата подвергалась рассеиванию на ситах с ячейками 5,0 и 0,5 мм. Полученные при рассеивании фракции +5 мм, 5-0,5 мм, -0,5 мм взвешивались с точностью 0,1 % от массы испытываемой пробы. Результаты испытаний агломерата на механическую прочность приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний агломерата на механическую прочность, лаборатория МК «Запорожсталь»

№	Средний диаметр частиц $d_i$ , мм						$d_{cp}$	j	Фракции агломерата после барабана, %		
	Высота слоя, мм										
	50	140	230	320	410	500			Ф (-0,5)	Ф (0,5-5)	Ф (+5)
	Ф1 (-1)	Ф2 (1-3)	Ф3 (3-5)	Ф4 (5-8)	Ф5 (8-12)	Ф6 (+12)					
1	0,9	3	5,2	7,1	9,8	12	6,33	0,562	11,2	37,9	50,9
2	1,1	3,2	5,1	7	9,6	12,2	6,37	0,572	10,9	39,8	49,3
3	0,8	3	5,6	7,3	10	11,9	6,43	0,55	11,5	37,1	51,4

где j – основность агломерата.

$$j = \frac{h_{cp}}{h_{cl}} ;$$

где  $h_{cp}$  – положение условной частицы с диаметром  $d_{cp}$  в слое относительно уровня засыпи, м ;  $h_{cl}$  – высота слоя шихты, м.

### Выводы

Предложенная модернизация узла загрузки агломерационной машины, за счет использования составного загрузочного лотка, обеспечивает более неравномерное, по сравнению с текущим, распределение твердого топлива в слое. Таким образом, предложенные закономерности распределения топлива, при спекании шихты в высоких слоях, 500 мм и более, обеспечивающих улучшение регенерации тепла отходящих газов, позволяет стабилизировать тепловой режим процесса спекания. Последнее достигается за счет сосредоточения топлива, в основном, в верхней половине слоя 61,6 %, что устраняет дефицит тепла в верхних и его переизбыток в нижних горизонтах, тем самым влияя на производительность процесса.

Результаты экспериментов, позволили сделать вывод, что при использовании загрузочного лотка предложенной конструкции, улучшаются сегрегационные процессы в слое, количество фракции -3 мм в верхних горизонтах слоя (0–100 мм) увеличилось с 54,3 % до 59,6 % по сравнению с действующей на предприятии схемой загрузки. Среднее содержание топлива на этих горизонтах возросло с 3,8 %, при использовании схемы барабанный питатель – загрузочный лоток, и 4,4 % при схеме вибрационный питатель – загрузочный лоток, до 4,76 %, при условии сокращения общего содержания твердого топлива в шихте с 3,6–3,8 % до 3,3 %.

Результаты испытаний свидетельствуют, что стабилизация теплового режима процесса спекания, позволила повысить механическую прочность и выход годного на 4,22 %. Полученное сокращение потребления коксика, при сохранении качественных показателей процесса спекания, потенциально позволит экономить до 388,25 тыс. грн. в год с шести агломашин, для условий аглофабрики предприятия.

### Список использованной литературы:

1. Лисиенко, В. Г. Теплофизика металлургических процессов [Текст]/ В. Г. Лисиенко, В. И. Лобанов, Б. И. Китаев// Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1982. – 240 с.

2. Петрушов С. Н. Формирование слоя шихты на агломашине [Текст]/ С. Н. Петрушов// Курс лекций. – Алчевск: ДонГТУ, 2006. – 187с.
3. Machida Satoshi. Optimization of coke breeze segregation in sintering bed under high pizolite ore ratio/ Satoshi Michida, Takahide Higuchi, Nobuoki Oyama etc.// ISIJ Int. – 2009/ – № 5. – P. 667–675.
4. Mashida Satishi. Optimization of coke segregation in sintering bed corresponding to determination in iron ore quality/ Matishi Mashida, Koichi Tamiura, Takahide Higuchi etc.// The 5 International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, Shanghai, Oct. 19-23, 2009. – Technical Program Beijing: Chin. Soc. Metals. – 2009. – P. 217–212.
5. Mitra Debanuc. Use of raw petroleum coke in sinter plants/ Mitra Debanuc, Korane Vipul, Ambastha Rabesh etc.// ISIJ Int. – 2009. №5. – P. 676–680.
6. Мных А. С. Определение оптимального распределения твердого топлива в слое загружаемой шихты для выравнивания теплового режима агломерационного процесса [Текст] / А. С. Мных // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – 2014. – № 6. – С. 47–51.
7. Мных А. С. Исследование систем загрузки полидисперсной аглошихты с целью обеспечения требуемого теплового режима процесса спекания [Текст] / А. С. Мных // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2015. – № 30. – С. 53–58.

#### References:

1. Lisienko M. (1982), Thermal metallurgical processes [Теплофізика металургічних процесів], Metalurgiya, Moscow, 240 p.
2. Petrushov S. (2006). Forming a layer of charge on the sintering machine. [Formirovanie sloya shihty na aglomashine], DonSTU, Alchevsk, 182 p.
3. Machida Satoshi. (2009), “Optimization of coke breeze segregation in sintering bed under high pizolite ore ratio”, ISIJ Int. No. 5. – P. 667–675.
4. Mashida Satishi. (2009), Optimization of coke segregation in sintering bed corresponding to determination in iron ore quality, The 5 International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, Shanghai, – Technical Program Beijing: Chin. Soc. Metals. – P. 217–212.
5. Mitra Debanuc. (2009), “Use of raw petroleum coke in sinter plants”, ISIJ Int. No. 5. – P. 676–680.
6. Mnyh A. (2014), “Determination of the optimal distribution of the solid fuel layer downloadable charge to align the thermal regime of the sintering process” [“Opredelenie optimal'nogo raspredeleniya tverdogo topliva v sloe zagruzhaemoj shihty dlya viravnivaniya teplovogo regima aglomeracynogo procesa”], Tehnicheskaya teplofizika i promishlenaya teploenergetika, No. 6, P. 47–51.
7. Mnyh A. (2014), “Research systems download polydisperse of sinter charge to ensure the desired thermal conditions of the sintering process” [“Isledovanie system zagruzki polidispersnoj shihty s cel'u obespecheniya trebuемого teplovogo regima spekaniya”]. Vestnik PSTU: Technical science, No. 30, P. 53–58.

Поступила в редакцию 22.02 2015 г.