

*Безверхий И.В.,
д.т.н. Томаш А.А.
(ЛГТУ, г. Мариуполь, Украина)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ

Експериментально встановлений спільний вплив сегрегації агломераційної шихти за крупністю, витрати вапна, зміни висоти шару на швидкість спікання і вихід придатного агломерату. Отримані рівняння, що дозволяють кількісно врахувати вплив інтенсифікуючих факторів на показники процесу спікання.

Ключові слова: *планування експерименту; інтенсифікація агломераційного процесу, вапно, висота шару, сегрегація, швидкість спікання, вихід придатного.*

Экспериментально установлено совместное влияние сегрегации агломерационной шихты по крупности, расхода извести, изменения высоты слоя на скорость спекания и выход годного агломерата. Получены уравнения, позволяющие количественно учесть влияние интенсифицирующих факторов на показатели процесса спекания.

Ключевые слова: *планирование эксперимента; интенсификация агломерационного процесса, известь, высота слоя, сегрегация, скорость спекания, выход годного.*

Агломерация остается основным методом окускования железорудного сырья доменной плавки в Украине. Использование в агломерационной шихте большой доли мелкодисперсного концентрата и отходов металлургического производства, колошниковой пыли и шламов, снижает производительность агломашин и повышает значение предварительной подготовки шихты и интенсификации процесса спекания. В настоящее время применяют следующие методы повышения технологических показателей процесса агломерации:

- использование извести, которая благотворно влияет как на окомкование шихты, так и на процесс спекания. Увеличение количества обожженной извести в шихте в настоящее время считается основным методом повышения производительности агломашин [1];
- повышение высоты спекаемого слоя является распространенным методом интенсификации агломерационного процесса, однако высота

слоя аглошихты зависит от её газопроницаемости и допустимого разрежения в вакуум-камерах. Поэтому увеличение высоты агломерируемого слоя должно сопровождаться повышением газопроницаемости шихты [2];

– в связи с тем, что частички твердого топлива обладают низкими комкующими свойствами, существенное положительное влияние на гранулометрический состав окомкованной агломерационной шихты оказывает подача части топлива в конце процесса окомкования. Частички топлива располагаются на поверхности гранул, благодаря чему ускоряется горение топлива, увеличивается вертикальная скорость спекания и повышается качество агломерата [3];

– значительный эффект дает предварительный подогрев шихты перед спеканием, в результате которого снижаются конденсация влаги в спекаемом слое и разрушение гранул в зоне переувлажнения [4];

– наряду с повышением качества окомкования аглошихты увеличению газопроницаемости спекаемого слоя способствует управляемая сегрегация материала по высоте при загрузке её на аглоленту. При этом достигается распределение, при котором диаметр гранул увеличивается в направлении от поверхности слоя к паллетам. Мелкие частицы не попадают в межкусковые пустоты крупных гранул, порозность и газопроницаемость аглошихты увеличиваются [5]. Кроме повышения газопроницаемости сегрегация аглошихты по высоте дополнительно позволяет решить задачи увеличения концентрации топлива в верхних горизонтах слоя, где обычно наблюдается его недостаток, и укладки крупных гранул, заменяющих постель, на колосниковую решётку [6].

Обычно в научных работах по совершенствованию агломерационного процесса исследуют влияние на скорость спекания каждого интенсифицирующего фактора в отдельности, пренебрегая их совместным влиянием.

Целью исследований является анализ совместного влияния интенсифицирующих факторов: увеличения расхода извести в аглошихту, высоты спекаемого слоя и усиления сегрегации шихты по крупности, - на показатели спекания агломерата.

Для оценки степени сегрегации аглошихты использовали показатель, основанный на гипотезе о соответствии её распределения по крупности статистическому распределению Вейбула. Степень сегрегации шихты характеризовали величиной

$$C = \sigma_{\phi} / \sigma_{ид}, \quad (1)$$

где σ_{ϕ} – среднеквадратичное отклонение средних диаметров частиц на каждом горизонте отбора проб от среднего диаметра гранул всей шихты;

$\sigma_{ид}$ – среднеквадратичное отклонение расчётных значений диаметров частиц на каждом горизонте отбора проб от среднего диаметра гранул всей шихты при идеальной сегрегации, когда каждому горизонту слоя соответствуют частицы строго одного диаметра, соответствующего распределению Вейбула.

Величина C изменяется от 0 до 1 по мере увеличения сегрегации и может быть использована в качестве числового аргумента зависимости характеристик спекаемого слоя от его структуры. Подобный подход применяли в работе [7].

Исследования проводили с шихтовой смесью, включающей 42,11 % концентрата, 10,53 % аглоруды, 10,53 % известняка, 5,26 % твёрдого топлива, 31,58 % возврата. После ручного смешивания, шихтовые материалы увлажняли и окомковывали в лабораторном окомкователе. Агломерацию производили при постоянном разряжении 10 кПа в аглочаше диаметром 220 мм. Высота слоя составляла 180 - 360 мм. Производительность агломерационной установки оценивалась по времени спекания, с учетом массы спёка и выхода годного. Продолжительность спекания по времени принимали от момента включения эксгаустера и зажигания топлива в верхних слоях шихты до момента достижения максимальной температуры в вакуум-камере. Скорость спекания определяли как отношение высоты слоя ко времени спекания. Спеченный пирог агломерата выгружали из чаши, разбивали вручную на куски и рассеивали на виброгрохоте с выделением годного агломерата фракции +10 мм. При проведении спекания в слое выше 200 мм на аглочашу ставилась надставка диаметром 220 мм и высотой 240 мм. Щель между чашей и надставкой уплотнялась гипсовой смесью.

В качестве функций отклика были выбраны скорость спекания (V , мм/мин.) и выход годного ($ВГ$, %). Учтённые факторы: степень сегрегации (C , д. ед.), расход извести (I , %), высота слоя (H , м), - варьировались на трёх уровнях (табл. 1). Кодированные факторы принимали значения: -1, 0, +1.

Связь между кодированными (X_i) и фактическими значениями факторов (C , I , H) определяется соотношениями:

$$C=(X_1-X_{10})/I_1 ; \quad I=(X_2-X_{20})/I_2 ; \quad H = (X_3 - X_{30})/I_3. \quad (2)$$

Таблица 1 – Интервалы и уровни варьирования факторов

Уровень	Степень сегрегации, C (X_1), д.ед.	Расход извести в шихту, I (X_2), %	Высота слоя, H (X_3), м
+1	0,72	6,0	0,36
0 (X_{i0})	0,40	5,0	0,27
-1	0,08	4,0	0,18
Интервал варьирования, I	0,32	1,0	0,09

Управление сегрегацией агломерационной шихты осуществляли изменением порядка её укладки. После окомкования аглошихту рассеивали на 6 фракций. Для устранения сегрегации ($C = 0,08$; $X_1 = -1$) каждую фракцию делили на 6 равных частей. Затем составляли 6 смесей, в состав которых входило по 1/6 части каждой фракции. Фракционный состав каждой смеси был одинаков и совпадал с фракционным составом всего материала. В чашу укладывали 6 слоёв из смесей одинакового гранулометрического состава. Максимальную сегрегацию ($C = 0,72$; $X_1 = +1$) получали, укладывая каждую фракцию отдельным слоем. Частичную сегрегацию ($C = 0,4$; $X_1 = 0,40$) создавали, распределяя фракции по 6 слоям в направлении сверху вниз в соответствии с таблицей 2.

Каждое спекание проводили 2 – 3 раза. Первая серия экспериментов проведена в соответствии с композиционным ортогональным планом 2-го порядка (табл. 3). Высота спекаемого слоя оставалась постоянной 180 мм.

Таблица 2 - Послойная укладка агломерационной шихты при частичной сегрегации

	Фракции аглошихты, мм					
	0 – 1	1 – 3	3 – 5	5 – 7	7 – 10	+ 10
1 слой	50 %	33,33 %	-	-	-	-
2 слой	50 %	33,33 %	33,33 %	-	-	-
3 слой	-	33,33 %	33,33 %	33,33 %	-	-
4 слой	-	-	33,33 %	33,33 %	50 %	-
5 слой	-	-	-	33,33 %	50 %	-
6 слой	-	-	-	-	-	100 %

Таблица 3 - План проведения и усредненные результаты первой серии экспериментов

№ опыта	X ₁ (С)	X ₂ (И)	ВГ, %	V, мм/мин
1	-1	-1	72,09	38,33
2	1	-1	33,33	41,82
3	-1	1	71,23	38,33
4	1	1	36,26	51,11
5	1	0	33,33	46,00
6	-1	0	80,00	38,33
7	0	1	53,85	41,82
8	0	-1	65,43	38,33
9	0	0	67,44	38,33

После обработки данных были получены следующие зависимости в кодированной форме:

$$V = 39,34 + 3,99X_1 + 2,13X_2 + 2,95X_1^2 + 0,86X_2^2 + 2,32X_1 \cdot X_2, \quad (3)$$

$$ВГ = 65,93 - 20,10X_1 - 1,55X_2 - 7,66X_1^2 - 4,67X_2^2 + 0,90X_1 \cdot X_2. \quad (4)$$

С учётом соотношений (2) уравнения зависимости скорости спекания и выхода годного от фактических значений факторов принимают вид:

$$V = 63,83 - 40,01C - 9,29И + 21,55C^2 + 0,86И^2 + 6,28C \cdot И, \quad (5)$$

$$ВГ = -24,92 - 16,11C + 44,23И - 55,96C^2 - 4,67И^2 + 2,43C \cdot И. \quad (6)$$

Анализ полученных зависимостей (рисунки 1 – 2) показал, что увеличение степени сегрегации повышает скорость спекания, но уменьшает выход годного. Влияние добавки извести аналогично, но слабее выражено. Заметный рост скорости спекания происходит при высоких показателях сегрегации ($C \geq 0,4$), но сопровождается значительным падением выхода годного.

Вторая серия спеканий проводилась по плану полного двухуровневого трёхфакторного эксперимента (таблица 4). Были получены следующие зависимости в кодированной форме:

$$V = 27,35 - 4,825X_1 + 4,075X_2 + 1,975X_3 + 1,9X_1 \cdot X_2 + 1,15X_1 \cdot X_3 + \\ + 0,25X_2 \cdot X_3 - 0,575X_1 \cdot X_2 \cdot X_3, \quad (7)$$

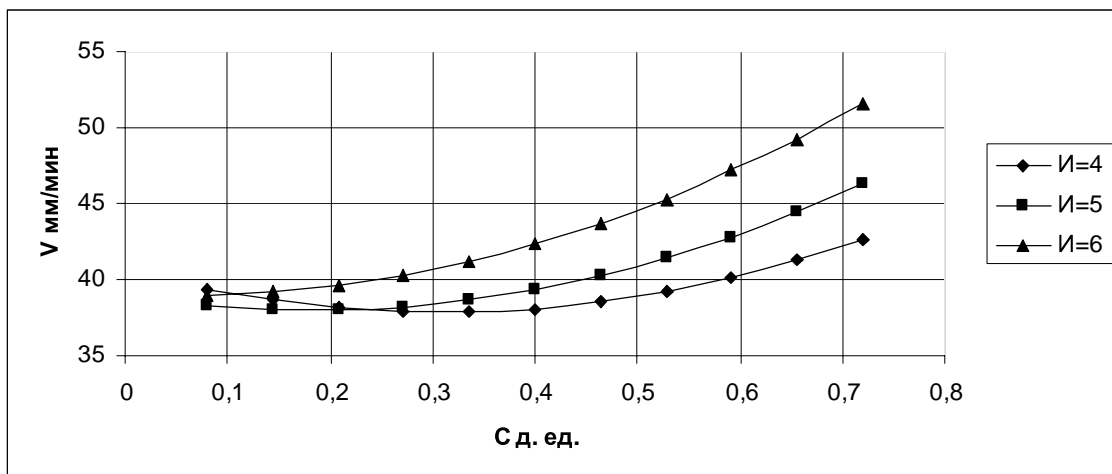


Рисунок 1 - Расчетная зависимость скорости спекания от степени сегрегации шихты при разном расходе извести (%)

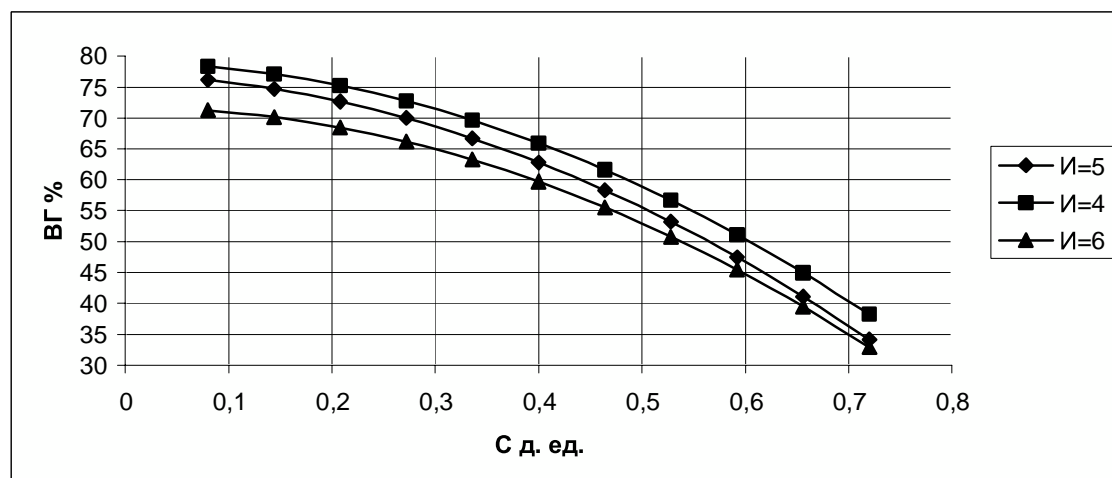


Рисунок 2 - Расчетная зависимость выхода годного агломерата от степени сегрегации шихты при разном расходе извести (%)

$$ВГ = 62,69 + 9,69X_1 - 11,57X_2 - 0,268X_3 + 6,93X_1 \cdot X_2 - 0,76X_1 \cdot X_3 - \\ - 1,35X_2 \cdot X_3 - 2,35X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (8)$$

После преобразований с учётом соотношений (2) получены зависимости скорости спекания от фактических значений интенсифицирующих факторов:

$$V = 63,57 - 83,81H - 35,93C - 3,94I + 165,79H \cdot C + 20,76H \cdot I + 6,17C \cdot I - 19,96H \cdot C \cdot I, \quad (9)$$

Таблица 4 – План проведения и усредненные результаты второй серии экспериментов

№	X ₁ (H)	X ₂ (C)	X ₃ (I)	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	ВГ	V
1	+	+	+	+	+	+	+	63,00	31,3
2	+	-	+	-	+	-	-	79,70	20,0
3	-	+	+	-	-	+	-	36,00	36,0
4	-	-	+	+	-	-	+	71,00	30,0
5	+	+	-	+	-	-	-	72,50	25,7
6	+	-	-	-	-	+	+	74,35	13,1
7	-	+	-	-	+	-	+	33,00	32,7
8	-	-	-	+	+	+	-	72,00	30,0

$$ВГ = 99,58 - 109,47H - 190,39C - 5,10I + 649,73H \cdot C + 24,18H \cdot I + 17,85C \cdot I - 81,81H \cdot C \cdot I. \quad (10)$$

Увеличение высоты спекаемого слоя значительно снижает скорость спекания (рисунок 3). Но увеличение степени сегрегации шихты по крупности и расхода извести ослабляет это влияние. При минимальных сегрегации шихты и расходе извести ($X_2 = -1$; $X_3 = -1$) увеличение высоты слоя с 0,18 до 0,36 м сопровождается снижением скорости спекания с 30,0 до 13,1 мм/мин. При максимальных сегрегации шихты и расходе извести ($X_2 = 1$; $X_3 = 1$) и таком же увеличении высоты слоя скорость спекания снижается с 36,0 до 31,3 мм/мин. Такое взаимное влияние учтённых факторов подтверждает вывод о том, что применение интенсифицирующих факторов, способствующих повышению газопроницаемости слоя, введения извести в шихту и увеличения сегрегации материалов по крупности, является необходимым условием повышения высоты спекаемого слоя.

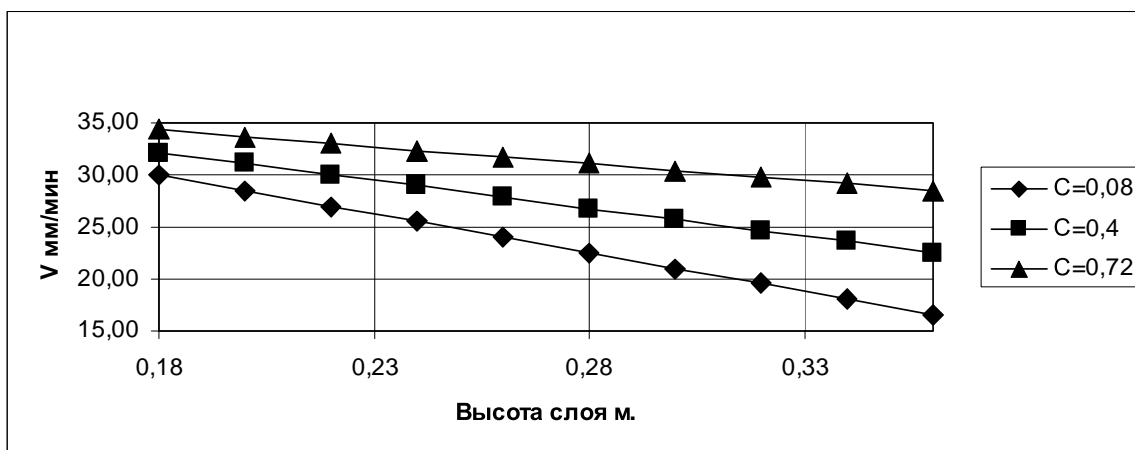


Рисунок 3 - Расчетная зависимость скорости спекания от высоты слоя при различной степени сегрегации

При этом влияние сегрегации шихты по высоте оказывает более сильное влияние, чем увеличение расхода извести, о чём свидетельствует более высокое значение коэффициента при X_2 ($b_2 = 4,075$) в полиноме (7), чем коэффициента при X_3 ($b_3 = 1,975$). Учитывая, что получение обожжённой извести – весьма дорогой и энергоёмкий процесс, усиление управляемой сегрегации шихты по крупности при загрузке представляется более перспективным направлением интенсификации производства агломерата.

Увеличение высоты спекаемого слоя практически устраняет снижение выхода годного при высокой степени сегрегации шихты (рисунок 4). По-видимому, снижение выхода годного при высокой скорости спекания агломерата в низком слое обусловлено недостатком времени пребывания высокотемпературной зоны горения топлива на каждом горизонте. Процесс плавления шихты и образования структуры агломерата не успевал завершиться до начала охлаждения спека. Увеличение высоты спекаемого слоя повышает его сопротивление проходу газов и способствует достижению соответствия скоростей движения зоны горения и образования агломерата.

Таким образом, увеличение высоты спекаемого слоя не только становится возможным при повышении степени сегрегации шихты, но и является необходимым условием усиления влияния интенсификаторов процесса спекания, способствующих повышению газопроницаемости аглошихты: сегрегации гранул по крупности и увеличения расхода извести. При этом обеспечивается высокая скорость спекания при сохранении достаточного уровня выхода годного агломерата и обеспечивается максимальная производительность аглоустановки.

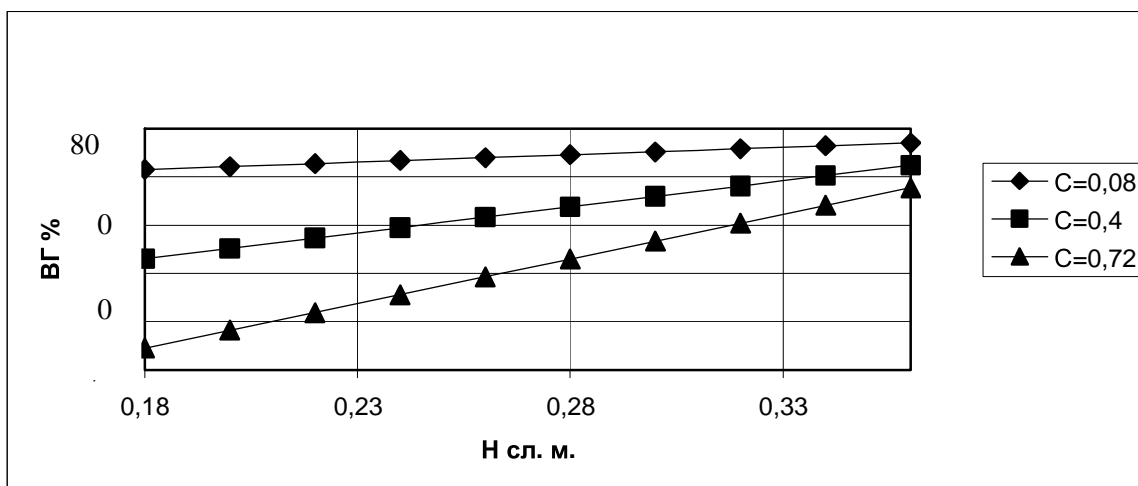


Рисунок 4 - Расчетная зависимость выхода годного (ВГ) от высоты слоя (Н) при различной степени сегрегации

Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты подчиняются известным тесно связанным принципам функционирования сложных систем, применяемых для анализа явлений доменной плавки: принципу затухания и сочетания [8]. Принцип затухания заключается в том, что максимальный эффект от применения каждого мероприятия по совершенствованию технологического процесса достигается при условиях, противоположных тем, к которым ведёт данное мероприятие. Его следствием является следующее положение: по мере приближения к режиму, соответствующему полной реализации данного мероприятия, эффективность его реализации снижается и в пределе может быть нулевой или отрицательной. Принцип сочетания сводится к тому, что наиболее эффективны сочетания таких мероприятий, которые воздействуют на основные процессы в противоположных направлениях. Действительно, по мере увеличения степени сегрегации и приближения её к максимальному значению $C = 1$ эффективность её применения уменьшается из-за снижения выхода годного агломерата. В то же время сочетание сегрегации шихты по крупности, повышающее газопроницаемость спекаемого слоя, и увеличение его высоты, повышающее сопротивление проходу газов и действующее на агломерационный процесс в противоположном сегрегации направлении, обеспечивает максимальный эффект в повышении производительности агломерационного процесса.

Выводы

1. Увеличение степени сегрегации агломерационной шихты по крупности является интенсифицирующим фактором, способствующим повышению газопроницаемости агломерационной шихты и ускорению процесса спекания, превосходящим по силе влияния увеличение расхода извести в аглошихту. С учётом больших энергетических и материальных затрат на производство извести управляемая сегрегация пред-

ставляется более перспективной. Наиболее сильное интенсифицирующее воздействие достигается при высокой степени сегрегации, $C \geq 0,4$.

2. Увеличение скорости спекания за счёт сегрегации шихты сопровождается снижением выхода годного агломерата из-за недостаточного времени пребывания высокотемпературной зоны горения на каждом горизонте спекаемого слоя. Влияние увеличения расхода извести в шихту аналогично, но более слабо выражено.

3. Увеличение высоты спекаемого слоя в сочетании с высокой степенью сегрегации шихты по крупности обеспечивает наибольшую эффективность интенсифицирующего воздействия на агломерационный процесс за счёт высокой скорости спекания и сохранения достаточного выхода годного агломерата.

4. Совместное влияние исследованных факторов на агломерационный процесс является проявлением принципов затухания и сочетания в агломерации.

Библиографический список

1. Вегман Е.Ф. *Теория и технология агломерации* / Е.Ф. Вегман. – М.: Металлургия, 1974. – 228 с.

2. Вегман Е.Ф. *Окускование руд и концентратов* / Е.Ф. Вегман. – М.: Металлургия, 1968. – 284 с.

3. Коротич В.И. *Теоретические основы окомкования железорудных материалов* / В.И. Коротич. – М.: Металлургия, 1966. – 152 с.

4. Коротич В.И. *Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке* / В.И. Коротич. – М.: Металлургия, 1978. – 207 с.

5. *Применение статистического критерия сегрегации для оценки перераспределения шихты по крупности при загрузке на агломерационную машину* / А.А. Томаш, И.В. Безверхий, В.А. Белоног, С.В. Кривенко // *Вісник приазов. Держ. Техн. Ун-ту: Зб. Науч. Пр.* – Маріуполь, 2005. – Вип. 15. – С. 13 – 16.

6. Петрушов С. Н. *Современный агломерационный процесс* / С. Н. Петрушов. - Алчевск: ДонГТУ, 2006. - 357 с.

7. Русанов И.Ф. *Совершенствование регулирования распределения материалов и газов по радиусу доменной печи: Автореферат канд. дисс.* / И.Ф. Русанов. – Донецк, 1989. – 24 с.

8. Товаровский И.Г. *Анализ показателей и процессов доменной плавки* / И.Г. Товаровский, В.В. Севернюк, В.П. Лялюк. – Днепрпетровск: Пороги, 2000. – 420 с.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Луценко В.А.