

УДК 622.7

**В.С. БІЛЕЦЬКИЙ**, д-р техн. наук

(Україна, Харків, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"),

**П.В. СЕРГЄЄВ**, д-р техн. наук

(Україна, Донецьк., Донецький національний технічний університет)

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕЛЕКТИВНОЇ МАСЛЯНОЇ АГРЕГАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

*Постановка проблеми.* Селективна масляна агрегація вугілля поєднує сукупність процесів структурування тонкої полідисперсної вугільної фази у водному середовищі за допомогою масляних реагентів. В основі процесів селективної масляної агрегації вугілля лежить механізм адгезійної взаємодії олеофільної вугільної поверхні з маслами, в результаті якого досягається її селективне змочування і агрегування в турбулентному потоці води. Гідрофільні часточки, не змочувані маслом в склад агрегатів не входять, що дозволяє виділяти їх у вигляді породної суспензії [1].

В залежності від режимних параметрів, технологічної схеми, досягаемого результату, закрема, виду продукту агрегації доцільно виділити масляну грануляцію (МГ), агломерацію (МА) та флокуляцію (МФ). При грануляції та агломерації в процес втягуються зерна вугілля до 3-5 мм, а при флокуляції – не більше 0,1-0,2 мм. Гранулят являє собою моно- або полідисперсний сипучий продукт, складений з сферичних і овальних гранул крупністю від 0,5-0,7 мм до 7-10 мм. Агломерат – це частково згранульоване полідисперсне вугілля представлене вуглемасляними комплексами крупністю від 0,2-0,3 мм до 1,1-1,3  $d_{\max}$  ( $d_{\max}$  – максимальний діаметр вугільного зерна). Флокули – пухкі або ущільнені вуглезв'язуючі комплекси крупністю не більше 0,2-0,3 мм. Питомі витрати масла-зв'язуючого взяті на 1000  $\text{cm}^2/\text{г}$  зовнішньої поверхні вугілля ( $S_{\text{пит.}}$ ) при грануляції складають 8...12 мас.% від сухої маси вугілля, при агломерації – 2...3 мас. %, флокуляції – 0,2...0,5 мас.%. Абсолютні значення витрат масла сильно залежать від параметра  $S_{\text{пит.}}$  та в'язкості зв'язуючого і коливаються в таких межах: для грануляту – 8...10 – 40÷50 мас.%; агломерату – 2...7 мас.%; флокуляту – 0,5...2 мас.%.

Обширні лабораторні дослідження, стендові та промислові випробування, експлуатація на вуглезбагачувальних фабриках підтверджують такі основні технічні можливості процесів СА вугілля маслом:

I. збагачення тонкодисперсного вугілля ( $\leq 0,1...0,2$  мм) зольністю до 60-70% при концентрації суспензії від 400-500 до 50-70 г/л з одержанням концентрату стабільної зольності в межах 5-20% і відходів зольністю 75-85% та більше;

II. знесірчування вугілля за рахунок видалення піритної сірки на 70-80%;

III. зневоднення вугілля до вологості 7-15%;

IV. облагороджування вугільної маси, яке полягає в "консервації" вугілля в агрегатах, що різко зменшує окиснення, розмокання, набухання вугілля підвищує його стійкість до механічних впливів, практично ліквідує пилоутворення.

Альтернативи методу масляної селекції при збагаченні ультратонкого вугілля (дрібніше 30-50 мкм) практично немає. Перспективним вважають застосування технології МГ і МА для гідротранспортуемого вугілля. На основі вуглемасляного агломерату можливе одержання нового виду палива – гранульованого вугілля та мазуто-вугільних суспензій для ТЕС і котелень, а також сировини для коксування. Все це стимулює дослідження з галузі МГ-МА. Селективна масляна агломерація знайшла промислове застосування при переробці відходів дрібних класів бітумінозного вугілля на двох підприємствах північного сходу США. Все це свідчить про перспективність СА вугілля маслами [2-8].

Сьогодні для дослідження і оптимізації процесу селективної масляної агломерації вугілля часто використовуються різні методи моделювання і оптимізації процесів масляної агрегації коксівного вугілля, зокрема програма SolidWorks, Statgraphics та ін. [9-12].

*Мета роботи* – одержання шляхом математичного моделювання сімейства статистичних моделей процесу масляної агломерації вугілля.

*Виклад основного матеріалу.* Методом ротатабельного центрально-композиційного планування експерименту одержані такі трифакторні моделі для визначення діаметру гранул (агломератів), що формуються за коалесцентним механізмом:

$$d_a = f(Q_M, \tau_a, n_B); \quad (1)$$

$$d_a = f(Q_M, \tau_a, t_c); \quad (2)$$

$$d_a = f(Q_M, \rho_{BC}, \tau_a); \quad (3)$$

$$d_a = f(\rho_{BC}, n_B, t_c); \quad (4)$$

$$d_{max} = f(Q_M, \tau_a, n_B). \quad (5)$$

Експериментальна область факторного простору: витрати масла зв'язуючого  $Q_M = 18-27$  мас.%; зв'язуюче – композиція брикетину і реагенту ААР-1 в масовій пропорції 1:4; густина водо-вугільної гідросуміші  $\rho_{BC} = 100-200$  л; температура гідросуміші  $t_c = 13-37^\circ\text{C}$ ; тривалість перемішування пульпи (пелетування вугільно-масляних агрегатів)  $\tau_a = 3-13$  хв. вибрана виходя-

## Загальні питання технологій збагачення

чи з технологічних особливостей вугілля та зв'язуючого, апріорної інформації по кінетиці процесу та з урахуванням результатів попередніх пробних дослідів.

Вихідне вугілля – марки Г шахти ім.Бажанова, ВО "Макіїввугілля", зольність  $A_B^d = 10,9$ , крупність 0-200 мкм. Межі зміни параметрів  $\rho_{bc}$  та  $t_c$  включають характеристики ряду пульп вуглезбагачувальних фабрик та фугатів в системах магістральних гідротранспортних систем. Досліди рандомізувалися. Довірча імовірність отриманих результатів  $p=0,95$ .

Значення коефіцієнтів поліномів (1)-(5) наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти поліномів					
Коефіцієнти	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5
$A_0$	1,223	1,097	1,195	1,202	1,839
$A_1$	1,150	1,289	1,222	-0,534	1,632
$A_2$	0,407	0,430	-0,039	0,507	0,341
$A_3$	0,249	0,025	0,551	-0,027	0,318
$A_{1,1}$	0,512	0,611	0,518	0,496	0,767
$A_{2,2}$	-0,001*	0,275	0,146	0,726	0,289
$A_{3,3}$	0,070,	-0,025	0,164	0,231	0,271
$A_{1,2}$	0,263	0,250	-0,113	0,275	0,088
$A_{1,3}$	0,538	0,000*	0,588	0,200	0,913
$A_{2,3}$	0,188	-0,125	-0,538	0,325	-0,163
Дисперсія адекватності	0,09	0,09	0,08	0,06	0,14
Постійні параметри	$\rho_{bc}=100\text{г/л}$ $t_c=18^\circ\text{C}$	$\rho_{bc}=100\text{г/л}$ $n_b=2250\text{хв}^{-1}$	$t_c=32^\circ\text{C}$ $n_b=2250\text{хв}^{-1}$	$Q_M=25\%$ $\tau_a=11\text{ хв}$	$\rho_{bc}=100\text{г/л}$ $t_c=32^\circ\text{C}$
* – незначимі коефіцієнти					

Багатофакторність процесу та висока чутливість об'єкту по каналах  $x_i-d_a$ ,  $z_j-d_a$  не дозволила одержати 4-х факторну модель. Тому спочатку в моделях (1), (2) та (3) визначені найменш значимі параметри – ними виявилися відповідно густина пульпи  $\rho_{bc}$ , швидкість обертання імпелера мішалки-агітатора  $n_b$  та температура середовища  $t_c$ . Далі серед цих параметрів за допомогою моделі (4) визначено найменш значимий параметр –  $t_c$ . таким чином, виділено дві моделі – (1) та (3), які включають порівняно найбільш значимі параметри –  $Q_M$ ,  $\tau_a$ ,  $n_b$ ,  $\rho_{bc}$ . Аналіз цих моделей показує збіжність одержуваних результатів з полігонними та промисловими дослідженнями.

Простежимо одержання однієї з виділених моделей, що включає найбільш значимі параметри, а саме (1):  $d_a = f(Q_M, \tau_a, n_b)$  і проаналізуємо її.

Матриця планування та результати експериментів.

X1	X2	X3	D <sub>3</sub>	D <sub>p</sub>
-1	-1	-1	0,9	0,890223
1	-1	-1	1,5	1,648
-1	1	-1	0,8	0,813647
1	1	-1	2,6	2,82142
-1	-1	1	0,3	0,154116
1	-1	1	2,8	2,86189
-1	1	1	0,7	0,62754
1	1	1	4,5	4,58532
-1,68179	0	0	0,6	0,763944
1,68179	0	0	5	4,72923
0	-1,68179	0	0,5	0,504172
0	1,68179	0	2	1,889
0	0	-1,68179	1,1	0,914456
0	0	1,68179	1,7	1,77872
0	0	0	1,1	1,15305
0	0	0	1,2	1,15305
0	0	0	1,1	1,15305
0	0	0	1,1	1,15305
0	0	0	1,2	1,15305
0	0	0	1,2	1,15305

Одержаний поліном для функції відгуку – середнього діаметра вугільно-масляних агломератів  $D$  з урахуванням значущості коефіцієнтів моделі має вигляд:

$$d = 1,15305 + 1,17889 \cdot X1 + 0,411712 \cdot X2 + 0,256946 \cdot X3 + 0,5634 \cdot X1^2 + 0,3125 \cdot X1 \cdot X2 + 0,4875 \cdot X1 \cdot X3 + 0,1375 \cdot X2 \cdot X3$$

Коефіцієнти моделі наведено в нормованому вигляді. Модель адекватна процесу, що досліджується. Про це свідчить високе значення коефіцієнта детермінації ( $R^2=99,0736\%$ ) і низьке значення стандартної похибки експерименту  $\text{Standard Error of Est.} = 0,166454$ .

На парето-графіку (рис. 1) показано характер і ступінь впливу факторів та ефектів їх взаємодій на діаметр вугільно-масляних агломератів  $d_a$ .

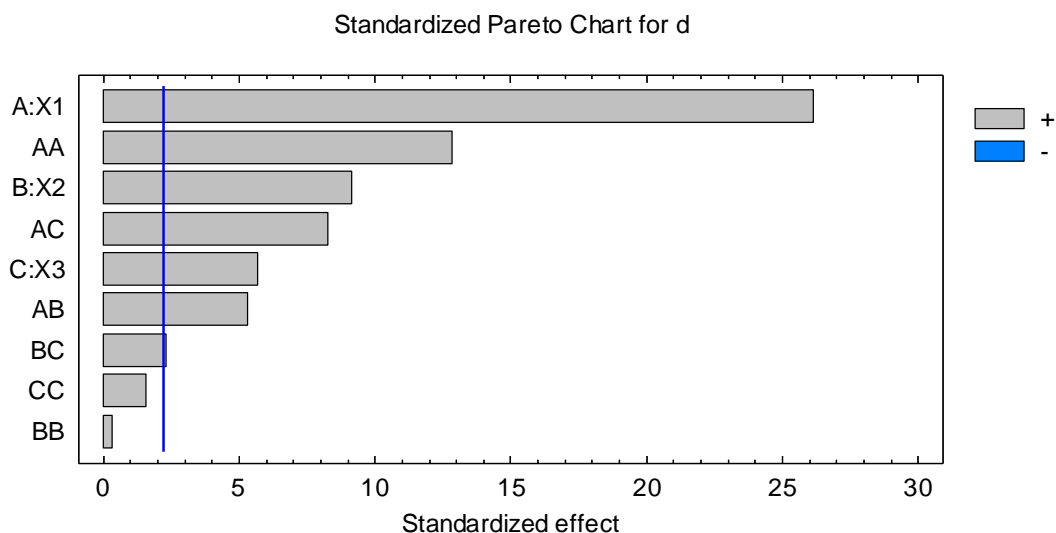


Рис. 1. Стандартизований парето-графік, який показує значимість коефіцієнтів при членах рівняння регресії

Найбільше впливають на діаметр гранул витрати зв'язуючого  $X_1$ , другий за значимістю фактор – тривалість агітації  $X_2$ . Фактор  $X_3$  – швидкість обертання імелера мішалки-агітатора менше впливає на функцію відгуку. Збільшення факторів  $X_1$ ,  $X_2$  та  $X_3$ , приводить до збільшення діаметра гранул.

На рис. 2 зображений графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції. Як бачимо, в більшості випадків різниця між цими даними невелика. Більшість експериментальних точок знаходиться поблизу прямої лінії.

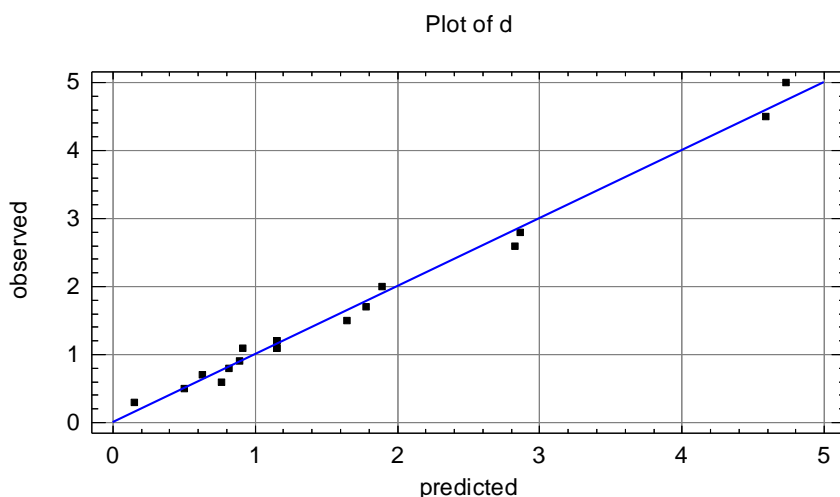


Рис. 2. Графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції

На рис. 3. подані часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції  $D(X_1, X_2)$  і  $D(X_2, X_3)$ ,  $D(X_1, X_3)$ .

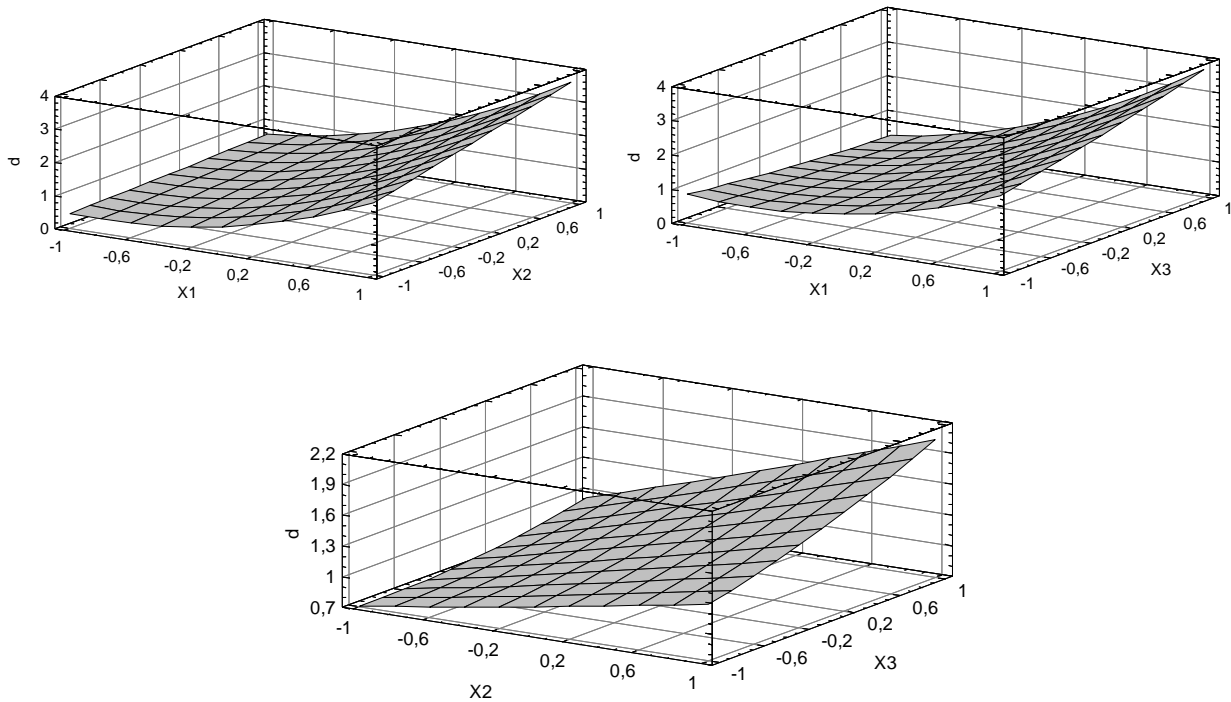


Рис. 3. Часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції  $D(X_1, X_2)$  і  $D(X_2, X_3)$ ,  $D(X_1, X_3)$

На рис. 4 наведені контурні криві цих гіперповерхонь. Простежується чітко збільшення діаметра  $D$  вуглемаляних агрегатів (гранул) з ростом витрат зв'язуючого в області  $Q_{зв} = 18-27$  мас.%, а також тривалості пелетування  $\tau_a = 3-13$  хв. При збільшенні  $Q_{зв}$  і  $\tau_a$  середній діаметр  $D$  збільшується з 0,5-0,7 до 3,0-4,0 мм.

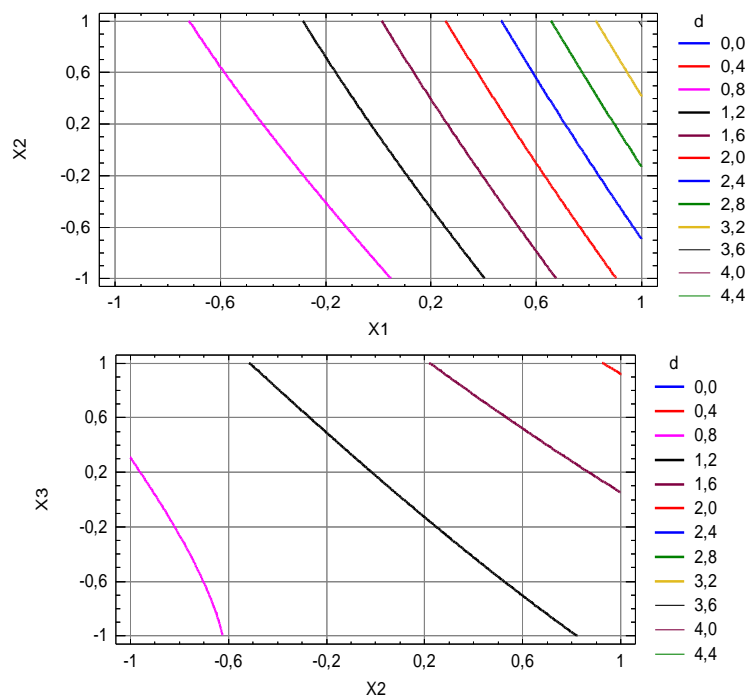


Рис. 4. Контурні криві гіперповерхонь, наведених на рис. 3

Контурні криві гіперповерхонь не показують наявності екстремумів поверхонь  $D(X_1, X_2)$ ,  $D(X_1, X_3)$ ,  $D(X_2, X_3)$  в досліджуваних межах факторного простору. Результати оптимізації показують, що максимальна крупність гранул складає  $D = 3,5-4,0$  мм. Режимні параметри, які забезпечують досягнення такого результату у перерахування на натуральні значення факторів:  $Q_{зв} = 27$  мас.%,  $\tau_a = 13$  хв.,  $\rho_{вс} = 200$  г/л;  $t_c = 32$  °С,  $n = 2250$  хв<sup>-1</sup>.

### *Висновки*

1. За результатами дослідів встановлено, що в процесі масляної агломерації вугілля марки Г вплив досліджуваних факторів на діаметр гранул за значимістю має таку послідовність: витрати зв'язуючого, тривалість агітації пульпи, швидкість обертання вала імпелера мішалки-агітатора. Результати оптимізації показують, що максимальна крупність гранул складає  $D = 3,5-4,0$  мм.

2. Одержані математичні моделі процесу масляної агломерації вугілля марки Г можуть бути використані для поглибленого дослідження впливу на процес обраних факторів, а також визначення режимних параметрів що забезпечують максимальну крупність гранул.

### **Список літератури**

1. Білецький В. С. Теорія і практика селективної масляної агрегації вугілля / В. С. Білецький, П. В. Сергєєв, Ю. Л. Папушин. – Донецьк : Грань, 1996. – 264 с.
2. Харада Т., Мацуо Т. Агломерація у рідинах // Ніхон Когьо Кайсі. – 1982. – № 1134. – С. 714-722.
3. Черемонов В.М. Исследование и разработка комплексной технологии обогащения и глубокого обезвоживания угольных шламов с добавкой вязких органических продуктов. Автореф. диссерт. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – М., 1973. – 25 с.
4. Елишевич А.Т., Папушин Ю.Л., Белецкий В.С. Обогащение угольных шламов методом масляной агломерации // Кокс и химия. – 1991. – № 5. – С. 7-9.
5. Курбатов В.П. Научно-технические направления повышения эффективности обогащения и использования коксующихся углей. Автореф. диссерт. на соиск. учен. степени докт. техн. наук. – Люберцы: ИОТТ, 1984. – 46 с.
6. Білецький В.С. Коксівні властивості вуглемасляних агломератів // Угле-химический журнал. – 2003. – № 3/4. – С. 3-7.
7. Brown N.A., Rigbi G.R., Callcott T.G. Coking behavior of coal recovery from slurry pipelines using a selective agglomeration technique // Fuel Process Technol. – 1980. – 3, №2. – P. 101-104.
8. Самилін В.М., Білецький В.С. Спеціальні методи збагачення корисних копалин: Курс лекцій. – Донецьк: Сх. вид. дім, 2003. – 115 с.
9. J.Spoelstra. The modelling of oil agglomeration of coal fines // Journal of Computational and Applied Mathematics. Volume 28, December 1989, Pages 359-366. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(89\)90347-6](https://doi.org/10.1016/0377-0427(89)90347-6).
10. G.H.V.C.Chary, M.G.Dastidar. Optimization of experimental conditions for recovery of coking coal fines by oil agglomeration technique // Fuel Volume 89, Issue 9, September 2010, Pages 2317-2322. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.12.016>.
11. Nevzat Aslan, İ. Ünal. Multi-response optimization of oil agglomeration with multiple performance characteristics. June 2011. Fuel Processing Technology 92(6):1157-1163. DOI

10.1016/j.fuproc.2010.05.029.

12. G.H.V.C. Chary. M.G. Dastidar. Optimization of experimental conditions for recovery of coking coal fines by oil agglomeration technique. // Fuel. September 2010. 89(9):2317-2322. DOI 10.1016/j.fuel.2009.12.016.

© Білецький В.С., Сергєєв П.В., 2018

*Надійшла до редколегії 12.02.2018 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*

УДК 691 (075.8)

**В.П. КРАВЧЕНКО**, канд. техн. наук

**Е.В. ТАРАНИНА**

(Україна, Мариуполь, Государственное ВУЗ "Приазовский государственный технический университет),

**В.Ф. ГАНКЕВИЧ**, канд. техн. наук

(Україна, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

### ПОЛУЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ ПЕРЕРАБОТКОЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

Актуальность темы, рассматриваемой в данной работе, заключается в решении проблемы переработки техногенных отходов металлургического производства – шлаков и порождаемой энергетическим кризисом проблемы тепло-сбережения путем использования в гражданском и промышленном строительстве дешевых теплоизоляционных материалов.

К основным направлениям переработки металлургических шлаков наряду с производством вяжущих, заполнителей и бетонов на их основе относится и получение материалов из шлаковых расплавов – шлаковой ваты, которая является разновидностью минеральной ваты и обладает высокими строительно-техническими показателями.

Сырьевой базой для производства шлаковой минеральной ваты являются шлаки как черной, так и цветной металлургии, а также природные материалы: базальты, диабаз, гранит и др. горные породы.

*Характеристика и технологический процесс получения минеральной (шлаковой) ваты*

Минеральная вата состоит из искусственных минеральных волокон. Производство ее включает две основные технологические операции – получение расплава и превращение его в волокно диаметром 2...10 мкм. Расплав получают, как правило, в шахтных плавильных печах-вагранках [1]. Превращение расплава в минеральное волокно производят дутьевым или центробежным способом. При дутьевом способе выходящий из печи расплав разбивается струей