

БІЛЕЦЬКИЙ В.С., д.т.н., професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

СЕРГЄЄВ П.В., д.т.н., професор, Донецький національний технічний університет (ДонНТУ)

ДОСЛІДЖЕННЯ МАСЛЯНОЇ АГРЕГАЦІЇ КОКСІВНОГО ВУГІЛЛЯ

Постановка проблеми. Лабораторні, напівпромислові та промислові дані, одержані рядом авторів, свідчать про *загальну тенденцію покращення коксівних властивостей шихти після її масляної агрегації*. Процес масляної агрегації застосовувався для збагачення і зневоднення коксівного вугілля на Губахінському і Авдіївському КХЗ. Зокрема, авторами [1-11] зафіксовано підвищення якості коксу за структурною міцністю і зольністю, збільшенню виходу рідких продуктів коксування та продуктивності коксової печі. В Україні ці дослідження проведені А. Гребенюком, В. Білецьким, І. Дідовцем, Т. Джакелі, С. Устиновською, А. Єлішевичем та ін. Зокрема, було проведено дослідження коксівних властивостей вугільної шихти (крупність 0 - 6 мм; $A_k^d = 8,2\%$; $V^r = 26,0\%$; $w_{tk}^r = 7\%$) після її гідротранспорту на відстань 450 км. Показано, що масляна агломерація практично нівелює негативний вплив гідравлічного транспорту на коксівні властивості вугілля. Вихідна шихта, агломерована ($Q_m = 2,5$ мас.%, мазут М100) та неагломерована шихта після гідротранспорту в турбулентному режимі при $V = 1,4 - 1,7$ м/с, $pH = 7,7$, тиску у трубопроводі $2 \cdot 10^5$ Па, $t_c = 18 - 25^\circ\text{C}$ зневоднювалася в центрифугі НОГШ - 325, просувувалася до вологості 7% і піддавалася ящичному коксуванню в камері коксування промислової батареї (Донецький КХЗ). Результати дослідження (табл. 1) показують значне погіршення якості коксу після гідротранспортування неагломерованої шихти. Масляна агломерація шихти в зменшує цей вплив. Зокрема, по показникам М25 та М10 кокс з агломерованої шихти краще ніж вихідний.

Таблиця 1. Результати ящичного коксування шихт

Об'єкт дослідження	Дробистість М25	Розтираємість М10	$W_{tkc}^r, \%$	A_{kc}^d	Щільність дійсна г/см ³	Пористість %
Вихідна шихта	87	6,0	2,43	12,10	1,66	35,20
Шихта після гідротранспортування: — неагломерована	82,8	6,8	1,10	12,75	1,80	43,80
— агломерована	93,0	3,9	0,97	12,00	1,86	43,40

За кордоном, Н. Брауном, Г. Рігбі та Т. Калькоттом проведено ґрунтовне дослідження коксівних властивостей вугілля вилучаємого з гідротранспортуємої суспензії методом масляної агломерації [12],

результати якого свідчать, що технологія селективної масляної агломерації гідравлічно транспортуемого вугілля крім економії коштів на транспортування і збагачення дозволяє на 16% збільшити вихід доменного коксу за рахунок: більш високого виходу збагаченого вугілля на 1 т рядового; більш високого виходу коксу із агломерату; більш низького виходу коксового дріб'язку внаслідок збільшення міцності коксу. При цьому рекомендується застосовувати масляні реагенти збагачені конденсованими ароматичними вуглеводнями [13].

Сучасний етап дослідження проблеми характерний використанням суміщених технологій, різних методів моделювання і оптимізацією процесів масляної агрегації коксівного вугілля [14-18].

Мета роботи – математичне моделювання процесу масляної агломерації коксівного вугілля.

Виклад основного матеріалу. Як вихідне вугілля прийнято вугілля марки Г шахти ім.Бажанова, ВО „Макіїввугілля“, $A_v^d = 10,9\%$, крупність 0-200 мкм. Експериментальна область факторного простору: витрати зв'язуючого $Q_m = 18-27$ мас.% (фактор X1); густина пульпи $\rho_{vc} = 100-200$ г/л (фактор X2); тривалість агітації водо-вугле-масляної суміші $\tau_a = 3-13$ хв. (фактор X3) вибрана виходячи з технологічних особливостей вугілля та зв'язуючого, апріорної інформації по кінетиці процесу та з урахуванням результатів попередніх пробних дослідів. Постійні режимні параметри: температура пульпи (середовища) $t_c = 32^\circ\text{C}$; швидкість обертання імелера мішалки-агитатора $n_b = 2250$ хв⁻¹; зв'язуюче – композиція брикетину і реагенту ААР-1 в масовій пропорції 1:4. Межі зміни параметрів включають характеристики ряду пульп вуглезбагачувальних фабрик та фугатів в системах магістральних гідротранспортних систем. Досліди рандомізувалися. Довірча імовірність отриманих результатів $p = 0,95$.

При плануванні експерименту застосовано ротатбельний центральнo-композиційний план експерименту другого порядку, який забезпечує однакову похибку по всьому факторному простору, матриця планування показана в табл.. 2. Для розробки плану експерименту та обробки одержаних експериментальних даних використовувалася стандартна комп'ютерна програма Statgraphics 5.1. Всі досліди виконані на стендовій установці, агломератор – імелерна мішалка з робочим об'ємом агітації пульпи 1 л.

Таблиця 2. Матриця планування експеримента.

X1	X2	X3	D _e	D _p
-1	-1	-1	0,5	0,417375
1	-1	-1	1,6	1,70415
-1	1	-1	1,8	1,69703
1	1	-1	2,8	2,58381
-1	-1	1	1	1,12933
1	-1	1	4,5	4,51611
-1	1	1	0,9	0,708986
1	1	1	3,5	3,59576
-1,68179	0	0	0,7	0,864616

1,68179	0	0	4,5	4,45823
0	-1,68179	0	1,5	1,41831
0	1,68179	0	1,6	1,80454
0	0	-1,68179	0,7	0,894561
0	0	1,68179	2,5	2,42828
0	0	0	1	1,09649
0	0	0	1,2	1,09649
0	0	0	1,1	1,09649
0	0	0	1,1	1,09649
0	0	0	1,2	1,09649
0	0	0	1	1,09649

Одержаний поліном для функції відгуку – середнього діаметра вугільно-масляних агломератів d_a з урахуванням значущості коефіцієнтів моделі (див. рис. 3) має вигляд:

$$d_a = 1,09649 + 1,06839 \cdot X_1 + 0,114827 \cdot X_2 + 0,455978 \cdot X_3 + 0,55329 \cdot X_1^2 + 0,5 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,182057 \cdot X_2^2 - 0,45 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,199735 \cdot X_3^2$$

Коефіцієнти моделі наведено в нормованому вигляді. Модель адекватна процесу, що досліджується. Про це свідчить високе значення коефіцієнта детермінації ($R^2 = 98,82\%$) і низьке значення стандартної похибки експерименту $\text{Standard Error of Est.} = 0,1802$

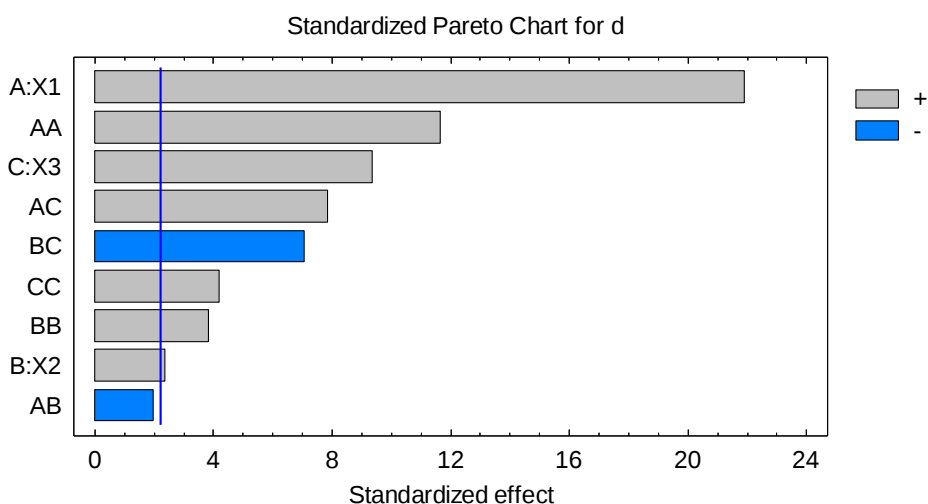


Рис. 3. Стандартизований парето-графік, який показує значимість коефіцієнтів при членах рівняння регресії.

Найбільше впливають на діаметр гранул витрати зв'язуючого X_1 , другий за значимістю фактор – тривалість агітації X_3 . Фактор X_2 – густина гідросуміші значно менше впливає на функцію відгуку.

Збільшення факторів X_1 та X_3 , приводить до збільшення діаметра гранул, а одночасне збільшення факторів X_2, X_3 – до його зменшення.

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

На рис. 4 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.

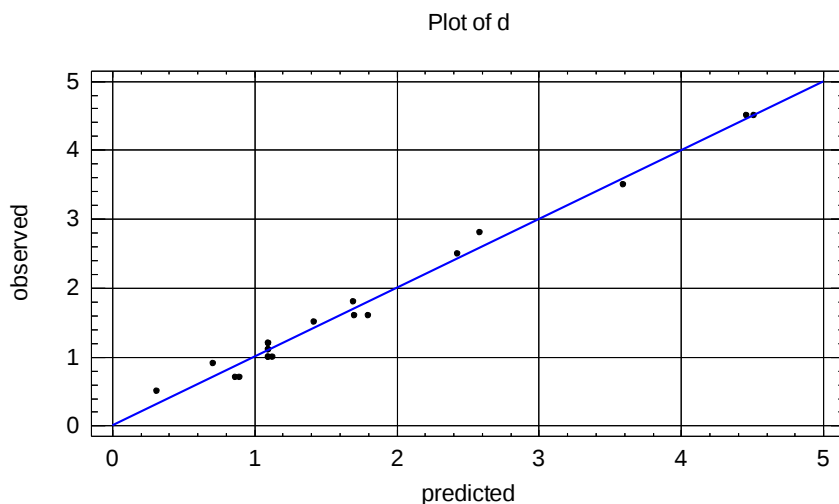
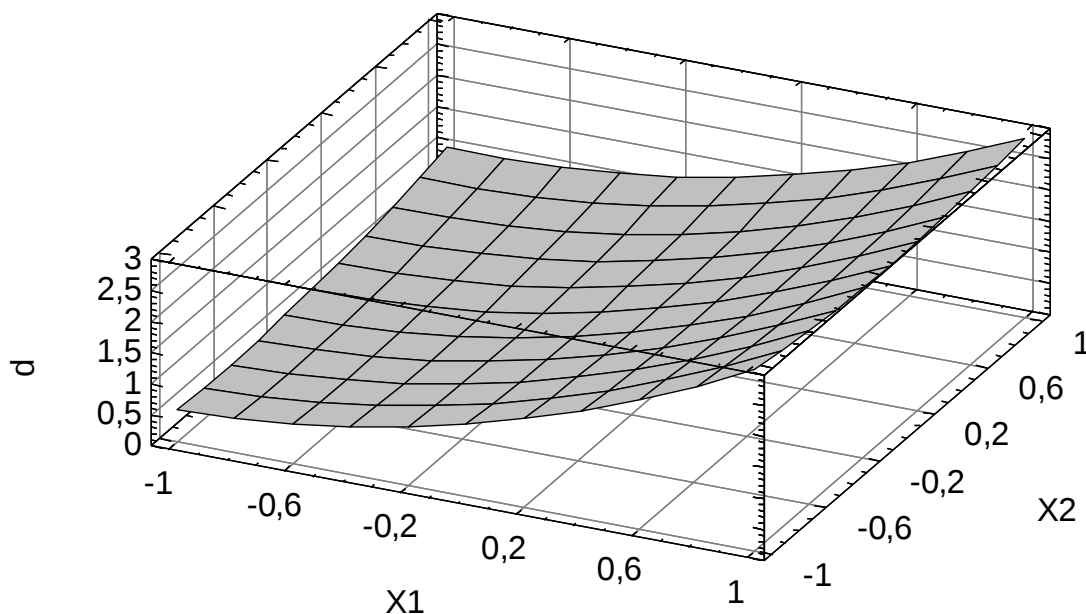


Рис. 4. Графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції.

На рис. 5. подані часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції $D(X_1, X_2)$ і $D(X_2, X_3)$, $D(X_1, X_3)$.

На рис. 6 наведені контурні криві цих гіперповерхонь. Простежується чітке збільшення діаметра D вуглемасляних 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 τ_a середній діаметр D збільшується з 0,5-0,7 до 3,0-4,0 мм.



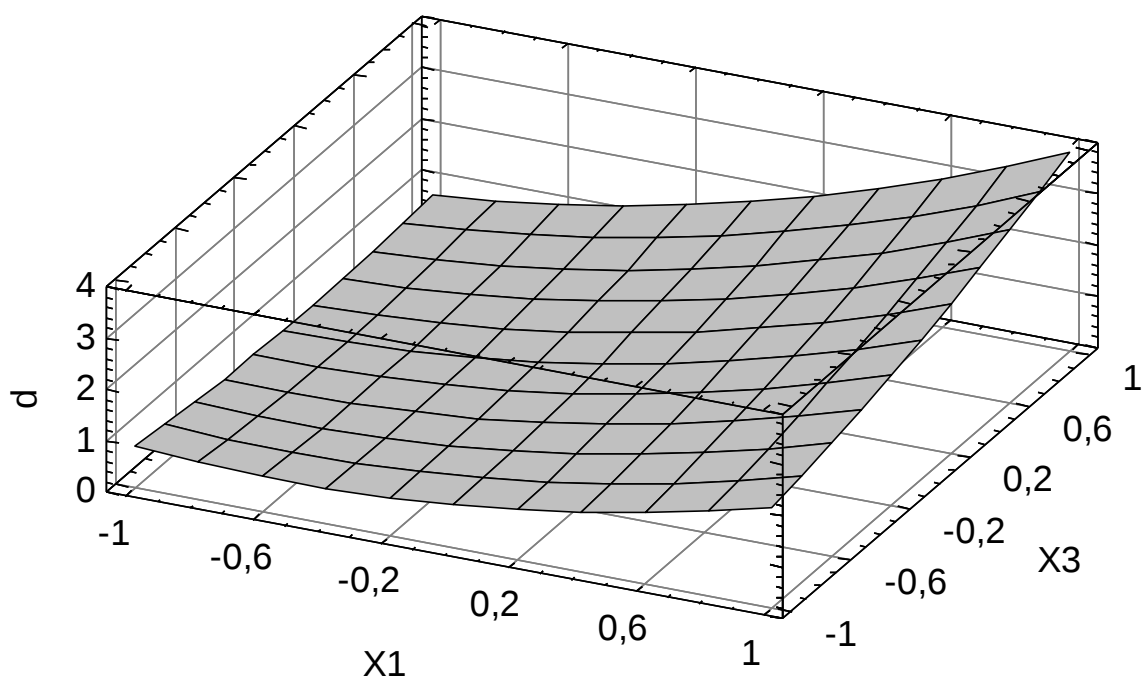
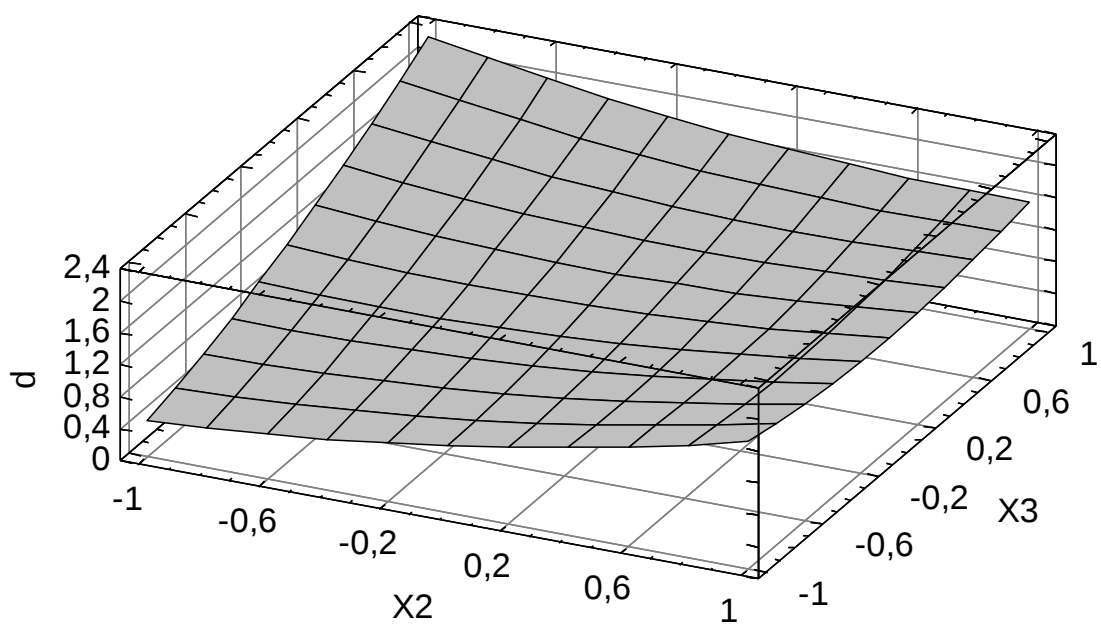


Рис. 5. Часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції $D(X_1, X_2)$ і $D(X_2, X_3)$, $D(X_1, X_3)$.

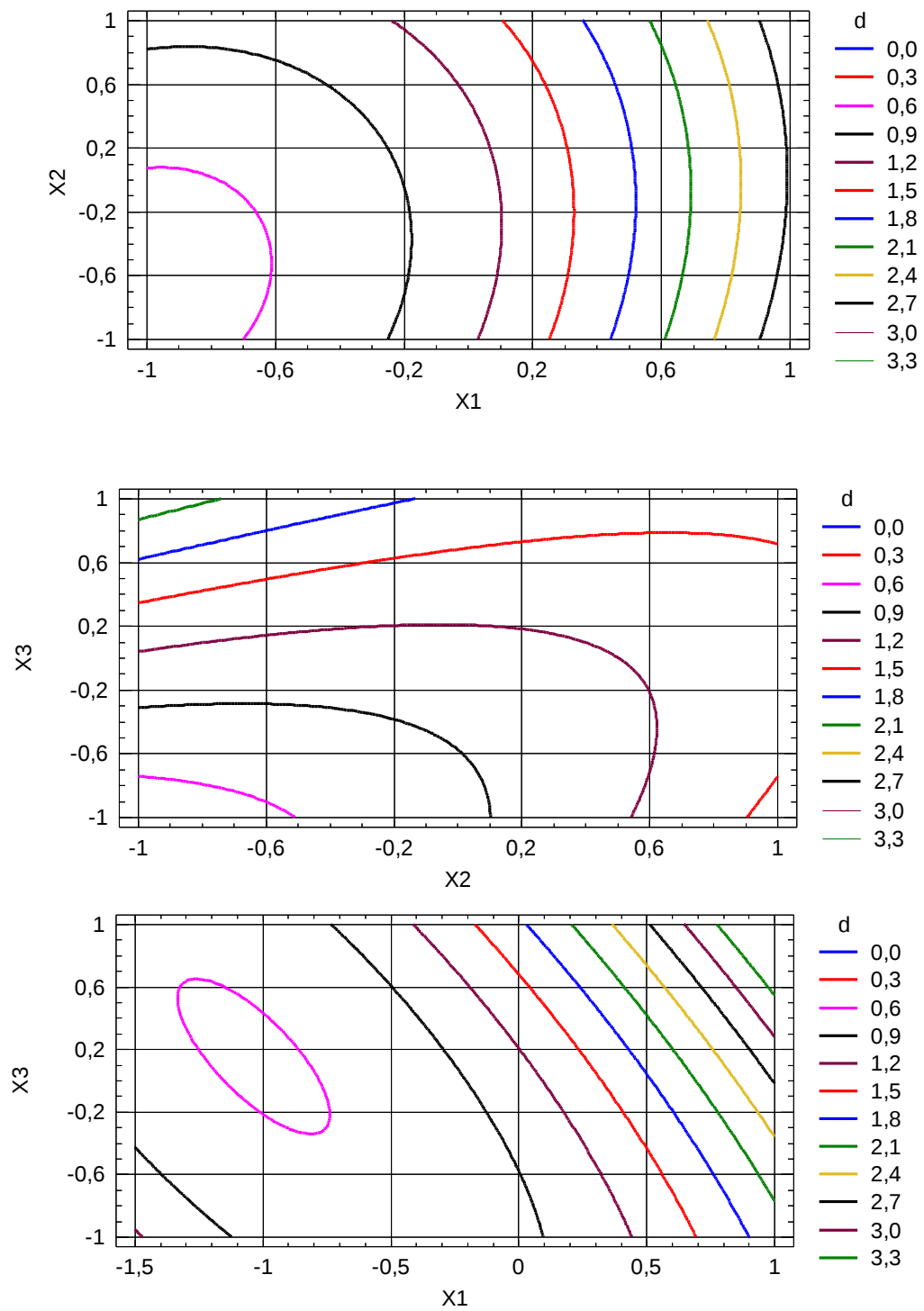


Рис. 6. Контурні криві гіперповерхонь, наведених на рис. 5.

Контурні криві гіперповерхонь показують наявність екстремумів поверхонь $D(X_1, X_2)$, $D(X_1, X_3)$. 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⁻¹.

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. Одержана математична модель процесу масляної агломерації коксівного вугілля марки Г може бути використана для поглибленого дослідження впливу на процес обраних факторів, а також визначення режимних параметрів що забезпечують максимальну крупність гранул.

Список використаних джерел

1. 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. 7.
2. Черемонов Б.М., Циперович М.В. Обогащение угольной мелочи методом масляной флотации// Подготовка и коксование углей. - Свердловск, 1967, вып. 7, С. 234-261.
3. А.с. 289117 СССР. МКИ С10В 57/12. Способ переработки угольной шихты/ В.М.Черемонов, М.В.Циперович, В.П.Курбатов. ВУХИН. - Заявл. 25.08.67. № 1182688/25-26. Опубл. 08.12.70. Бюл. № 1. - 4 с. 9.
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. Schmidt J. Beitrag zur Untersuchung der Agglomeratbildung im Rahmen der Agglomerationsflotation unter besonderer Berücksichtigung der Olzusammensetzung// Freiberg Forschung, 1968, A, № 449, S. 73-130.
6. Накамура Тикара. Влияние гранулирования на качество кокса// Тэцу тохаганэ. - 1986, т. 7 В.П. 2. № 12. - С. 854.
7. Дипельт В.М., Гофман М.В. К вопросу о механизме взаимодействия органических спекающих добавок с углями в процессе коксования// Научные основы производства кокса, М.: Металлургия, 1967. С. 148-153.
8. 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.

9. Исследование влияния дальнего гидротранспортирования на технологические свойства углей и шихт и обеспечение качеств, необходимых для процесса коксования / Т. И. Джакели, В. Г. Трофимова, С. А. Устиновская, О. А. Толочко, А. Т. Елишевич, В. С. Белецкий, А. Ф. Гребенюк, И. Г. Дедовец // Химия и физика угля. – К., – 1991. – С. 91–108.

10. Коксівні властивості вуглемасляних агломератів / В. С. Білецький // УглеХимический журнал. – 2003. – № 3/4. – С. 3–7.

11. Білецький В. С. Теорія і практика селективної масляної агрегації вугілля / В. С. Білецький, П. В. Сергєєв, Ю. Л. Папушин. – Донецьк : Грань, 1996. – 264 с.

12. 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.

13. В.С. Білецький, П.В.Сергєєв, Продукти коксохімії як реагенти для флотації, селективної флокуляції та агломерації вугілля . //УглеХимический журнал.№ 5-6, 2016, С. 12-18.

14. Самилін В. М. Спеціальні методи збагачення корисних копалин : курс лекцій / В. М. Самилін, В. С. Білецький ; Донец. нац. техн. ун-т, Донец. від-ня Наук. т-ва ім. Шевченка . – Донецьк : Сх. вид. дім, 2003 . – 115 с.

15. 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)

16. 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>

17. 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

18. 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., д.т.н., професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

СЕРГЄЄВ П.В., д.т.н., професор, Донецький національний технічний університет (ДонНТУ)

ДОСЛІДЖЕННЯ МАСЛЯНОЇ АГРЕГАЦІЇ КОКСІВНОГО ВУГІЛЛЯ

Експериментально показано, що масляна агломерація вугілля покращує коксівні властивості шихти. Процес масляної агрегації застосовувався для збагачення і зневоднення коксівного вугілля на Губахінському і Авдіївському КХЗ. Методом планування експерименту із застосуванням

ротатбельного центрально-композиційного плану експерименту другого порядку встановлено залежність крупності вуглемасляних агрегатів від витрат масла-зв'язуючого, густини гідросуміші та тривалості перемішування. 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 імелера мішалки-агітатора. Одержана математична модель процесу масляної агломерації коксівного вугілля марки Г може бути використана для поглибленого дослідження впливу на процес обраних факторів, а також визначення режимних параметрів що забезпечують максимальну крупність вуглемасляних агрегатів.