

ГЕОТЕХНОЛОГІЯ ВИДОБУТКУ СОЛОНОГО ВУГІЛЛЯ НА ОСНОВІ СУМІЩЕННЯ ПРОЦЕСІВ «СВЕРДЛОВИННЕ ГІДРОВИДОБУВАННЯ-ГІДРОТРАНСПОРТ-ЗНЕСОЛЕННЯ»

Актуальність роботи обумовлюється дефіцитом вітчизняних паливно-енергетичних ресурсів та необхідністю розширення паливно-енергетичної бази видобутку вугілля. З використанням методики планування експерименту виконано моделювання процесів гідротранспорту, зневоднення та знесолення засоленого вугілля Західного Донбасу. Зокрема використані методи центрально-композиційного ротатабельного планування; обробка експериментальних даних на ПК з використанням стандартних підпрограм Statgraphics plus 5.1.; йонометрія (pNa-метрія).

Ключові слова: геотехнологія, солоне вугілля, свердловинний гідровидобуток, гідротранспорт, зневоднення, знесолення, суміщені технології, моделювання, технологічна схема, планування експерименту.

Актуальность работы обуславливается дефицитом отечественных топливно-энергетических ресурсов и необходимостью расширения топливно-энергетической базы добычи угля. С использованием методики планирования эксперимента выполнено моделирование процессов гидротранспорта, обезвоживания и обессоливания засоленного угля Западного Донбасса. В частности использованы методы центрально-композиционного ротатабельного планирования; обработка экспериментальных данных на ПК с использованием стандартных подпрограмм Statgraphics plus 5.1.; йонометрия (pNa-метрия).

Ключевые слова: геотехнология, соленое угля, скважинный гидровидобуток, гидро-транспорт, обезвоживания, обессоливания, совмещенные технологии, моделирование, технологическая схема, планирование эксперимента.

Relevance of the work caused a deficit of domestic energy resources and the need for expansion of the fuel and energy base of coal mining. With the use of experimental design techniques performed simulation of hydraulic transport, dehydration and desalting of salinity Western Donbass coal. In particular, the methods used by the Central composite rotatable planning; analysis of experimental data on a PC using the Statgraphics plus 5.1 standard routines; yonometriya (pNa-meters).

Keywords: geotechnology, salty coal, downhole gidrovidobutok, hydraulic transport, drainage, desalination, combined technology, modeling, process flow diagram, design of experiments.

Проблема видобутку та переробки «солоного» вугілля. Сьогодні однією з найбільш актуальних є проблема забезпечення країни вітчизняними енергоносіями. Це обумовлено дефіцитом власних запасів нафти і газу, все більш жорсткою ціновою політикою на газ і нафту на світовому ринку, та частковим згортанням вітчизняної вугільної промисловості. Тому особливого значення набуває пошук нових альтернативних джерел енергоресурсів, зокрема збільшення масштабів залучення до паливно-енергетичного балансу так званого «солоного вугілля» характерного підвищеним вмістом солей натрію і хлору, значні запаси якого виявлені на Західному і Північному Донбасі.

Солоним або „лужним” називається вугілля з аномально підвищеним вмістом лужних мінералів, в основному солей натрію (Na^+) і калію (K^+) [1, 18-20].

Вперше термін «солоне» вугілля з’явився у 1952 році і був сформульований Г. Лемманом, який вивчав буре „лужне” вугілля східної Німеччини. [2]. Родовища солоного вугілля відомі у багатьох країнах світу - Німеччині, Польщі, США, Казахстані, Україні. Для більшості з них характерна низька ступінь метаморфізму, а основними домішками є водорозчинні сполуки натрію.

На сьогодні розвідані запаси солоного вугілля в Україні складають понад 25 млрд. Це близько 5% всіх існуючих вугільних запасів країни [4]. В основному поклади солоного вугілля розташовані на північній і західній околицях Великого Донбасу. Найбільш вивченими в геологічному плані є Новомосковське (Дніпропетровська область) і Старобільське (Луганська область) родовища [18, 20]. У Росії частка солоного вугілля складає 7% [4], а в інших країнах 3-10%.

Гранично допустимий вміст шкідливих домішок є основною ознакою за якою солоне вугілля виділяють з ряду іншого. До таких домішок відносять сполуки натрію та хлору. Основним критерієм „солоності” прийнято вважати вміст оксиду натрію у вугіллі. Так в США солоним вважають вугілля із вмістом Na_2O більше 0,5 % на суху масу [2, 4] в Німеччині із вмістом Na_2O у золі більше 2% [18]. В Англії та Австралії прийняті два критерії виділення солоного вугілля - за вмістом оксиду натрію (4,5% в золі та 1% у сухому вугіллі) та за вмістом хлору на суху масу вугілля - 0.5% [7-8].

Інститутом фізико-органічної хімії та вуглехімії НАН України запропонований більш досконалий метод віднесення вугілля до солоного – визначається вміст оксиду натрію у золі, потім розраховують його вміст у сухому вугіллі, та визначають вміст хлору. Якщо вміст оксиду натрію перевищує 0,5% [9], а також вміст хлору перевищує 0,5% [10,7,11], то визначають вид сполук натрію у вугіллі. Якщо натрій входить до складу NaCl , Na_2SO_4 чи гумітів, то досліджене вугілля відносять до солоного [3]. Існує два припущення щодо джерел „засолення”: 1. Морська вода [6,11]; 2. Вмісні породи [12,13]. Згідно першого припущення засолення вугілля морською водою відбувалося в басейнах, які утворилися у прибережно-морських та лагунних умовах седиментації [5]: Рурський (Німеччина), Карагандинський (Росія), частково Донецький (Україна), та ін. Згідно другого припущення засолення вугілля відбувалося серед галогенних порід де знаходиться ряд родовищ палеоген-неогенового віку, внаслідок руйнування соленосних відкладень (Німеччина).

В цілому можна сказати, що труднощі які виникають при використанні солоного вугілля спонукають багатьох вчених до пошуку нових альтернативних рішень технології переробки солоного вугілля.

Огляд досліджень та публікацій з проблеми. Над проблемою використання солоного вугілля сьогодні працюють ряд вчених у ФРН, США, Англії, Польщі, Австралії і інш. країнах [1-25], де дефіцит вугільної сировини назрів раніше, ніж в Україні.

У 1980-90-х роках у нашій країні проведено ряд досліджень теоретичного і прикладного плану, метою яких було створення перспективних технологій переробки вітчизняного солоного вугілля. Зокрема, такі дослідження провели Державний інститут мінеральних ресурсів (ДІМР) України, Донецький комплексний відділ інституту “ВНИИПИ-Гидротранспорт” (нині НВО “Гаймек”), Дніпропетровський хіміко-технологічний інститут, Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН України, Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії (ІНФОВ) НАН України, Донецький політехнічний інститут (нині – Донецький національний технічний університет). Всі ці дослідження показали, що радикальним способом облагороджування солоного вугілля є його гідралічна промивка. Разом з тим, процес видобутку, знесолення і зневоднення лужного вугілля багатоопераційний. Його спрощення можливе шляхом застосування суміщених процесів.

Мета наукової роботи – розробка технологічних основ суміщеного процесу: «свердловинний гідромоніторний видобуток – гідротранспорт – зневоднення – знесолення вугілля».

Основний матеріал і результати. В якості вихідного для досліджень вибрано засолене вугілля Західного Донбасу марки «Д», як перспективне для гідромоніторного видобування з наступною водопромивкою, яка протікає починаючи від субпроцесу гідромоніторного видобування – далі в процесі гідротранспорту водовугільної суміші – до субпроцесу зневоднення. Характеристики вихідного вугілля подані в табл. 1.

Таблиця 1. - Характеристики «солоного» вугілля марки “Д” Новомосковського родовища

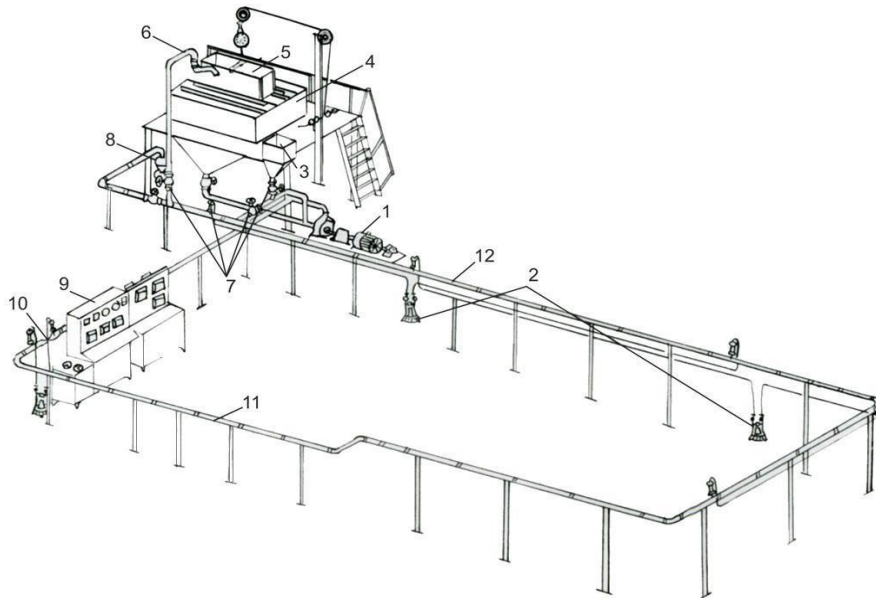
Показники якості	Проба 1	Проба 2
Густина, кг/м. куб.	1383,0	1355,4
Крупність, мм	0-3	0-3
Вологість W_t^r , %	21,5	20,5
Зольність, A^d , %	11,7	12,0
Вихід летких V^r , %	42,0	44,1
Теплотворна здатність, Q_B^r , кдж/кг	30 601	30 729
Вміст Na_2O :		
- в золі	7,56	3,43
- у вугіллі	0,88	0,41

Гідромоніторний видобуток вугілля поділяють на шахтний і свердловинний. Досвід шахтного гідровидобутку є в ряді регіонів світу і в Україні. Перша у світі дослідно-промислова гідрошахта побудована у 1939 р. в Україні, на Донбасі (трест «Орджонікідзевугілля»). В 90-х рр. ХХ ст. в Україні діяли 5 гідрошахт. За кордоном гідрошахти діють в Канаді («Балмер»), ФРН («Ганза»), Новій Зеландії («Стронгмен»), Китаї («Лінцятуо»), Японії («Сунагава»), Росії («Інська», «Ювілейна» на Кузбасі та ін.). Середня продуктивність праці на робітника по видобутку на гідрошахтах Донбасу — 60,2 т/місяць. Очисна виїмка вугілля в гідрошахтах ведеться гідромоніторами, механогідралічними комбайнами в коротких лавах без кріплення очисного простору і довгих лавах — механізованими комплексами з гідротранспортом вугілля по лаві [28].

Досвід свердловинного гідровидобутку вугілля суттєво менший – ця технологія запропонована і апробована тільки на початку ХХІ ст. [16, 17]

Експериментальне дослідження процесу «гідротранспорт – знесолення» солоного вугілля.

Експериментальне обладнання. Параметри гідротранспорту, а також можливість знесолювання вугілля в процесі гідротранспорту досліджені авторами [25] на пілотній установці (рис. 1).



а)

б)

Рисунок 1 – Пілотна установка гідротранспортування вугілля

а) схема установки; б) світлина виміральної ділянки установки.

1 — шламний насос з двигуном постійного струму; 2 — дифманометри; 3 — завантажувальна воронка; 4 — підпорна ємкість; 5 — мірно-вагова ємкість з динамометром; 6 — перекидний пристрій; 7 — засувки; 8 — зливна воронка; 9 — щит приладів та керування; 10 — труба Вентурі; 11 — трубопровід; 12 — вимірвальна ділянка

Установка являла собою стенд зі скляних труб діаметром 104 мм. Протяжність скляного трубопроводу складала 52 м. Технологічний комплекс допоміжного обладнання дозволяє здійснювати завантаження необхідної кількості солоного вугілля в гідротранспортну установку для створення гідросуміші заданої концентрації, відбір проби гідросуміші, що рухається по трубопроводу, визначення гранулометричної характеристики транспортованого матеріалу, оперативне заповнення гідротранспортних установок водою та їх промивку. Збільшення концентрації гідросуміші здійснювалось шляхом послідовних завантажень вугілля з урахуванням його вологості. Вимірювання параметрів транспортування гідросуміші реалізовано за допомогою контрольно-виміральної апаратури, що забезпечувало безперервний контроль та запис основних показників. Вимірювання витрат (швидкості) здійснювалось витратоміром Вентурі, протарованим об'ємно-ваговим способом.

Використовуючи первинний експериментальний матеріал, одержаний при гідротранспорті засоленого вугілля Новомосковського родовища побудовано ряд кривих, що дають уявлення про кінетику явищ у сумісному процесі «гідротранспорт-знесолювання» [29]. Дані отримані при використанні у якості вихідного солоного вугілля марки «Д» Но-

вомосковського родовища, $A^d = 12\%$, вміст Na_2O у вугіллі – 0,41 %, в золі – 3,43 %, крупність вугілля 0-3 мм. Для гідротранспорту і промивки використовувались водопровідна вода (мінералізація 0,17 г/л). Аналіз змін характеристик солоного вугілля та во-

ди в процесі гідротранспорту [29] показує зменшення вмісту Na_2O у вугіллі (рис. 2, крива 1) до 50 км шляху, а потім його підвищення. При 200 км шляху вміст оксиду натрію у вугіллі наближається до початкового. З цими даними кореспондується зміна концентрації йонів Na^+ у водному середовищі (рис. 2, крива 2), яка на початку гідротранспортування, при інтенсивному знесолюванні, різко зростає, а потім знижується. Зміна концентрації йонів Cl^- (крива 3) також має декілька характерних ділянок. По-перше, це яскраво виражений максимум в області 25 км, який змінюється відносною стабілізацією рівня йонів Cl^- на ділянці 50-150 км. Таким чином, наочно прослідковується явище вторинного соленакопичення у вугільній речовині, особливо після 50 км гідротранспортування.

В роботах [20, 29] виконано дослідження змін характеристик транспортної води в умовах, імітуючих сумісний процес «знесолювання-гідротранспорт». Для цього змодельований процес гідротранспорту в режимі Т:Р=1:1; швидкість транспортування 1,2 м/с. Вихідним слугувало солоне вугілля Новомосковського родовища пласта C_{12} крупністю 0-3 мм, вміст Na_2O у вугіллі 0,9 % зольність 10,9 %. Дальність гідротранспортування складала 50-52 км. Для промивки-гідротранспорту використана водопровідна вода з різним ступенем мінералізації (від 0,2 до 1,5 г/л). Досліджувалось омаслене та неомаслене вугілля, що дає можливість оцінки впливу попереднього омаслювання вугілля на процес знесолювання. Масляним агентом прийнята суміш флотореагенту ААР і паливного мазуту марки М100. Через кожні 4 км змодельованого за часом переміщення пульпи шляху транспортування контролювався показник рNa гідросуміші (використано йонімір І115М). Результати досліджень, що представлені на рис. 3, так само, як і виконані раніше дослідження фіксують наявність явища вторинного соленакопичення, яке для цих умов спостерігається на ділянці після 30 км (мінімум кривої рNa (L)).

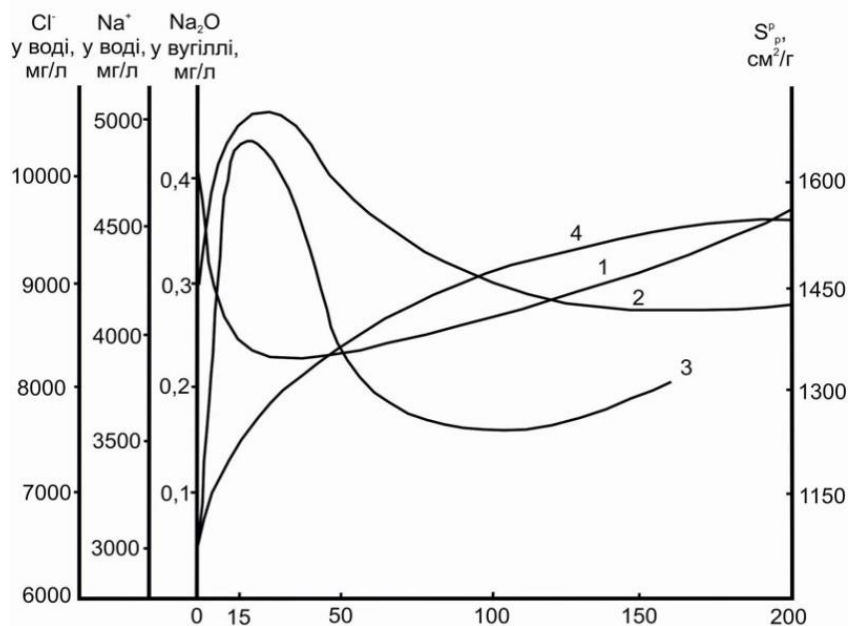


Рисунок 2 – Експериментальна залежність характеристик солоного вугілля та водного середовища від дальності гідравлічного транспортування [29]:

1 – вміст Na_2O у вугіллі, %; 2 – концентрація йонів Na^+ у воді, мг/л; 3 – вміст іонів Cl^- у воді, мг/л; 4 - зміна зовнішньої питомої поверхні вугілля S_p при гідротранспортуванні, $\text{см}^2/\text{г}$

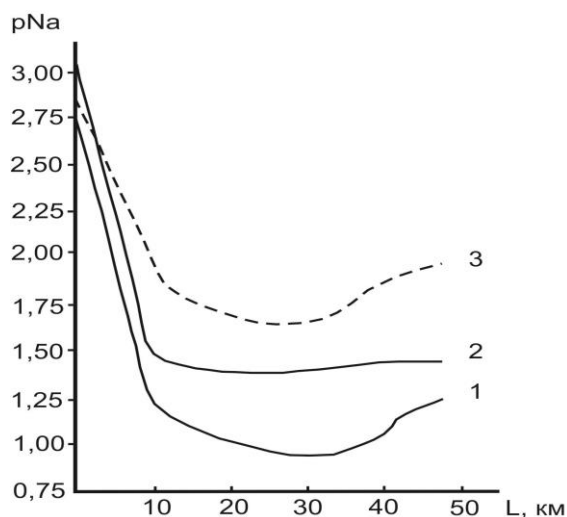


Рисунок 3 – Експериментальні залежності зміни pNa водного середовища від дальності гідро транспортування [20, 29]:

1,3 – залежності pNa (L) для неомасленого солоного вугілля при різноманітній мінералізації вихідної води (0,2 і 1,5 г/л відповідно); 2 – залежність pNa (L) для обмасленого солоного вугілля при витраті масла 0,3 мас. % на суху масу вугілля (мінералізація вихідної води 0,2 г/л)

Ефект, очевидно був би ще помітніший при більш високій вихідній мінералізації водного середовища. Для обмасленого вугілля цей ефект помітно менший, ніж для необмасленого, що, очевидно, пояснюється його порівняно меншою дезінтеграцією в процесі гідротранспортування.

Таким чином, лабораторні дослідження і пілотні випробування суміщеного процесу «знесолювання-гідротранспорт» вугілля показують наявність явища вторинного соленакопичення, яке суттєво зменшується при використанні часткової масляної агрегації солоного вугілля.

Отже, експериментально підтверджено можливість реалізації суміщеного процесу «гідротранспорт – знесолення» лужного вугілля. При цьому встановлено, що процес солевидалення під час гідротранспортування протікає на ділянці перших 25-30 км. Надалі в результаті подрібнення вугілля сіль адсорбується з розчину на новій поверхні і спостерігається ефект вторинного засолення вугілля. Додаткове обмаслювання вугілля усуває цей ефект.

Експериментальне дослідження процесу зневоднення вугілля виконано методом планування експерименту. Прийнятий центрально-композиційний ротатабельний план, що забезпечує однакову помилку по усьому факторному простору. Об'єктом досліджень прийнято обмаслене солоне вугілля пласта C_{12} Новомосковського родовища Західного Донбасу. Зміст Na_2O в цьому вугіллі складав 0,9 %. Зольність - 10,9%. Кернові проби вугілля дробилися до крупності 0-3 мм. Для моделювання процесу зневоднення використовувалася лабораторна центрифуга ЦЛС-3. Реагентом служив паливний мазут марки М100.

Вибір факторів. При зневодненні вугілля механічними методами основними чинниками, що визначають вологість кінцевого продукту є: зовнішня питома поверхня вугілля (тобто його крупність), характеристики пористості вугільної речовини, фізико-хімічні властивості вугільної поверхні, а також фактор Фруда Fr при центрифугуванні.

Отже, вибираються чотири варійовані чинники: $S_{пит}$, Fr , Q_1 і Q_2 (Q_1 - подача масла-реагенту відразу після видачі гідросуміші на поверхню (проммайданчик свердловини), Q_2

- подача масла-реагенту після закінчення процесу солевидалення або безпосередньо перед центрифугою). Вони задовольняють вимогам, які висувають до факторів планованого експерименту: керованості, однозначності, сумісності і незалежності.

Експериментальна область факторного простору. Зовнішня питома поверхня $S_{\text{пит}}$ вугілля, яке знесолюють за технологією ДІМР України (0-3 мм) становить, згідно [20] $1450 \text{ см}^2/\text{г}$. Для вугілля крупністю 0-0,1 мм. (варіант знесолення вугілля для цілей зрідження або приготування паливних суспензій) зовнішня питома поверхня $S_{\text{пит}}$ становить $2650 \text{ см}^2/\text{г}$. Тому діапазон варіювання параметра $S_{\text{пит}}$ приймаємо рівним $1500\text{-}2500 \text{ см}^2/\text{г}$.

Виходячи з літературних даних діапазон варіювання витрат реагенту Q_1 вибираємо рівним 0,1-0,4 мас.%. Витрати Q_2 вибираємо рівними 2,5-5,5 мас.% що, за даними [20] забезпечує як гідрофобізацію поверхні вугілля, так і стійку роботу центрифуги. Діапазон зміни фактора F_r приймається рівним 400-1000, що відповідає характеристикам сучасних вітчизняних центрифуг або трохи нижче їх можливостей.

Реалізовано ПФЕ типу 2^4 [20]. Обробка отриманих даних виконана за допомогою підпрограми Statgraphics plus 5.1. Поліном, який адекватно моделює процес зневоднення при довірчій ймовірності 0,95 має вигляд:

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_4X_4 + A_{1,1}X_1^2 + A_{2,2}X_2^2 + A_{3,3}X_3^2 + A_{4,4}X_4^2, \quad (1)$$

Значення коефіцієнтів і дисперсії адекватності:

Коефіцієнти:

$A_0 = 15,938$; $A_{1,2} = -0,016$; $A_1 = 1,462$; $A_{1,3} = 0,010$; $A_2 = -0,586$; $A_{1,4} = 0,005$; $A_3 = -0,188$; $A_{2,3} = -0,010$; $A_4 = -0,210$; $A_{2,4} = 0,005$; $A_{1,1} = 0,045$; $A_{2,2} = 0,196$; $A_{3,3} = 0,190$; $A_{4,4} = 0,175$;

Незначимі коефіцієнти: $A_{1,2}$; $A_{2,3}$; $A_{1,3}$; $A_{2,4}$; $A_{1,4}$; $A_{3,4}$.

Дисперсія адекватності дорівнює 2,16. Модель адекватна.

Аналіз інтерполяційного рівняння (1), яке після підстановки коефіцієнтів має вигляд:

$$Y = 15,94 + 1,46 \cdot X_1 - 0,59 \cdot X_2 - 0,19 \cdot X_3 - 0,21 \cdot X_4 + 0,05 \cdot X_1^2 + 0,20 \cdot X_2^2 + 0,19 \cdot X_3^2 + 0,18 \cdot X_4^2$$

показує, що найбільш значущим є фактор "зовнішня поверхня" (X_1) – див. Паретто-графік на рис. 4. Причому, зі збільшенням X_1 , як і слід було очікувати виходячи з апріорної інформації, вологість кеку центрифуги зростає.

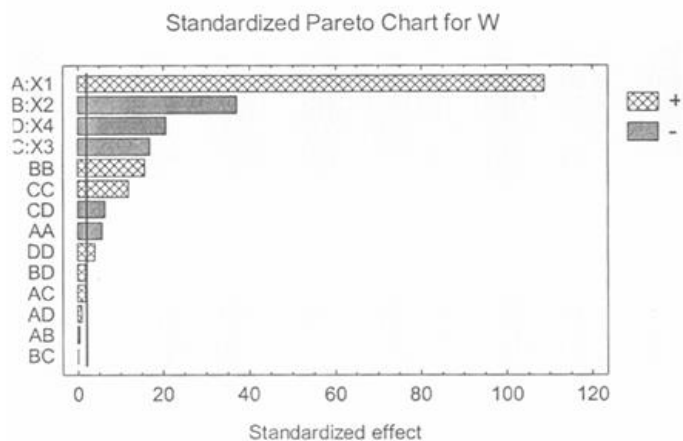


Рисунок 4 – Паретто-графік коефіцієнтів моделі

Однозначна оцінка впливу інших трьох факторів X_2, X_3, X_4 утруднена. Аналіз впливу факторів на вологість кеку виконувалася за гіперповерхнями (рис. 5) і контурними кривими. При цьому в області планування варіювалися значення одночасно двох чинників. Особливу увагу було приділено оцінці впливу на результати зневоднення вуглемасляного агломерату солоного вугілля подач зв'язуючої речовини $Q_1 Q_2$ (відповідно фактори X_2, X_4).

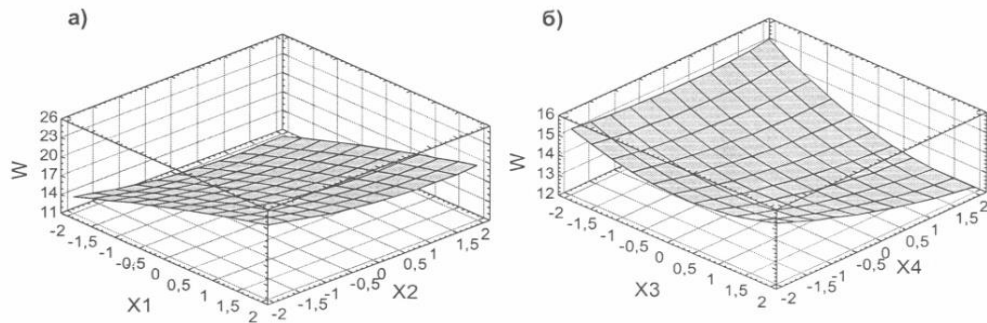


Рисунок 5 – Тривимірні перетини гіперповерхні $Y(X_i)$

Показано, що збільшення числа Fг позитивно позначається на результатах зневоднення досліджуваного матеріалу. Аналіз математичної моделі процесу зневоднення вугілля обмасленого солоного вугілля дозволяє зробити висновок, що найбільш значущими факторами, що впливають на вологість кеку центрифуги, є X_1 і X_2 , які визначаються крупністю вихідного вугілля і витратою реагенту на обмаслювання вугілля.

Отримана математична модель може бути використана для прогнозування результатів зневоднення обмасленого солоного вугілля Західного Донбасу.

Математичне моделювання процесу знесолення обмасленого вугілля виконано з допомогою планування експерименту. Об'єктом досліджень слугувало вугілля пласта C_{12} Новомосковського родовища Західного Донбасу. Вміст Na_2O в цьому вугіллі становив 0,9 %. Зольність - 20 %. Вугілля перед знесоленням попередньо обмаслювалось. Основною метою моделювання було отримання адекватної моделі, включає, по-перше, основні фактори, які впливають на процес, виділені раніше ДІМР, ДонНТУ.

Вибір факторів. Виходячи з апіорної інформації отриманої в дослідженнях ІМР і ДонНТУ основними факторами, впливаючими на процес знесолення вугілля промиванням у водному середовищі є: тривалість промивки τ_0 , мінералізація вихідної води, режим турбулізації водовугільної суміші і густина пульпи ρ_n (Т:Р). При цьому параметр мінералізації вихідної води є практично важко регульованим, так як залежить від реальних гірничо-геологічних умов та (або) схемних рішень по демінералізації води (технологія ДІМРа). Тому в якості варійованих факторів моделі були обрані: тривалість промивання τ_0 , частота обертання імелера мішалки n_m , густина пульпи ρ_n і витрати реагенту Q_1 . В якості обмаслюваного агента використано композиційний реагент на основі топкового мазуту марки М 100 і флотореагенту ААР -1. Вибрані фактори задовольняють вимогам керованості, однозначності, сумісності та незалежності, яким повинні задовольняти різні фактори при плануванні експерименту

Експериментальна область факторного простору. За даними ДІМР найбільш інтенсивно відбувається солевиділення в період перших 10 хв. промивання солоного вугілля. Тому діапазон варіювання тривалості промивання τ_0 прийнятий 2-10 хв. Інтенсивність перемішування водовугільної пульпи при промиванні є найменш вивченим фактором. Вихо-

дячи з попередніх даних по знесоленню вугілля Західного Донбасу (ДІМР), раціональних режимів гідротранспортування вугілля (суміщений процес "гідротранспорт-знесолення"), а також з урахуванням технічних рішень, що застосовуються у вугільній промисловості, діапазон варіювання n_m прийнятий 1000-2000 xv^{-1} . Межі області зміни ρ_p прийняті рівними 100 - 300 г/л, що відповідає рекомендаціям ДІМР і ДонНТУ[20]. Діапазон зміни фактора Q_1 вибрано рівним 0,1 – 0,4 мас.% на основі виконаних нами раніше експериментів.

Реалізовано [20] повний факторний експеримент (ПФЕ) типу 2^4 . Обробка експериментальних даних виконана за допомогою Statgraphics plus 5.1. Поліном, який адекватно моделює процес знесолення вугілля при довірчій імовірності 0,95 має вигляд:

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_4X_4 + A_{1,1}X_1^2 + A_{2,2}X_2^2 + A_{3,3}X_3^2 + A_{4,4}X_4^2, \quad (2)$$

Значення коефіцієнтів:

$$A_0 = 0,465; A_{1,2} = 0,001; A_1 = 0,037; A_{1,3} = -0,000; A_2 = 0,009; A_{1,4} = -0,001; A_3 = 0,010; A_{2,3} = 0,001; A_4 = 0,024; A_{2,4} = 0,000; A_{1,1} = -0,016; A_{2,2} = -0,017; A_{3,3} = 0,015; A_{3,4} = -0,001; A_{4,4} = -0,014;$$

Модель адекватна.

Аналіз рівняння регресії (2), яке після підстановки коефіцієнтів має вигляд:

$$Y = 0,465 - 0,037 \cdot X_1 - 0,009 \cdot X_2 + 0,010 \cdot X_3 + 0,024 \cdot X_4 - 0,016 \cdot X_1^2 - 0,017 \cdot X_2^2 - 0,015 \cdot X_3^2 - 0,014 \cdot X_4^2,$$

показує, що найбільш значущим (див. рис. 6) при знесоленні вугілля є фактор "часу" (X_1).

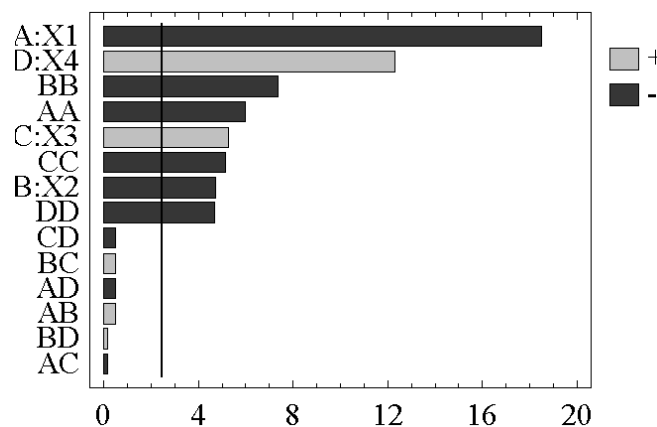


Рисунок 6 – Парето-карта коефіцієнтів моделі

При цьому, зі збільшенням X_1 залишкова концентрація Na_2O в обробленому вугіллі зменшується. Це повністю відповідає даним ДІМР України про вплив фактору "часу" на процес знесолення. Крім того інтерполяційне рівняння регресії показує однозначний вплив фактора "гідродинаміки" (X_2) на процес знесолення.

У цілому, можна відзначити, що фактори (X_1, X_2) в основному визначають режим знесолення (рис. 7). Збільшення значень факторів X_1 та X_2 в межах $X_1 = 2-10$ хв., $X_2 = 1000-2000$ хв⁻¹ спричиняє зниження залишкової концентрації Na_2O у вугіллі з 0,9 % до 0,38-0,39 %, тобто на 42-43 %.

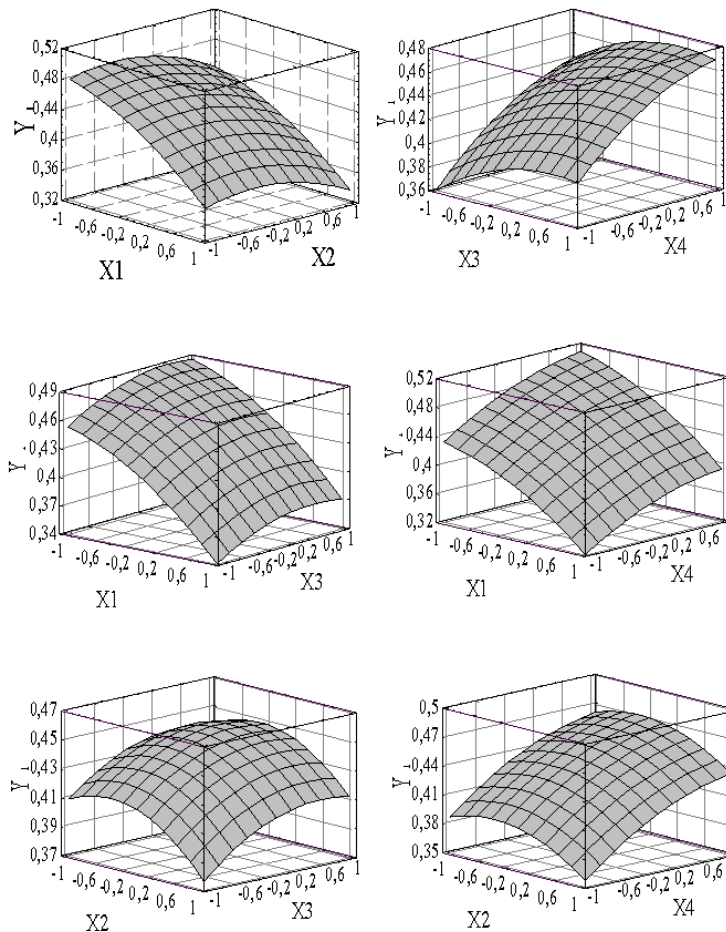


Рисунок 7 – Тривимірні перетини гіперповерхні $Y(X_i)$

Що стосується факторів "густина" (X_3) і "обмаслювання" (X_4), то оцінки їх впливу на процес солевидалення за рівнянням регресії неочевидні (коефіцієнти лінійних і квадратичних членів мають протилежні знаки). Тому, аналіз їх впливу проводився при часткових їх перетинах гіперповерхонь. При збільшенні густини водовугільної суспензії з 100 до 250 г/л, при інших рівних умовах ($X_1 = 6$ хв., $X_2 = 1500$ хв⁻¹), спостерігається збільшення залишкової концентрації Na_2O у знесоленому вугіллі в середньому на 5-7 %. Причому крива $Y = f(X_3)$ у зазначених межах варіювання фактора X_3 має експоненціальний характер. Отже, фактор "густина" має порівняно невеликий вплив на процес знесолення.

Збільшення фактора "обмаслювання", як і очікувалося, призводить до незначного погіршення процесу солевидалення. При зміні в межах X_4 0,1-0,4 мас.% відносно збільшення залишкової концентрації Na_2O в знесоленому вугіллі становить 9-11 % ($X_1 = 2-10$ хв., $X_2 = 1500$ хв.⁻¹, $X_3 = 200$ г/л).

Дослідження ежекторного способу глибокого зневоднення вугільної фази. Традиційні методи механічного зневоднення зернистих матеріалів – дренавання, грохочення, фільтрація, центрифугування, осадження у воді з ущільненням осаду – сьогодні в основному вичерпали себе. Їх розвиток іде головним чином екстенсивно – за рахунок

збільшення відцентрової сили, вакууму, конструктивних вдосконалень тощо. Серед перспективних методів механічного зневоднення дрібнодисперсних матеріалів особливої уваги заслуговує метод аеромеханічного зриву водної плівки [27]. Схема дослідної установки зневоднення вугілля зривом водної плівки ежектуванням показана на рис. 8.

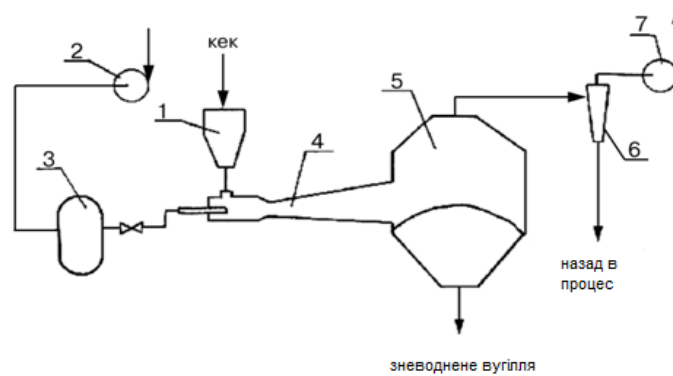


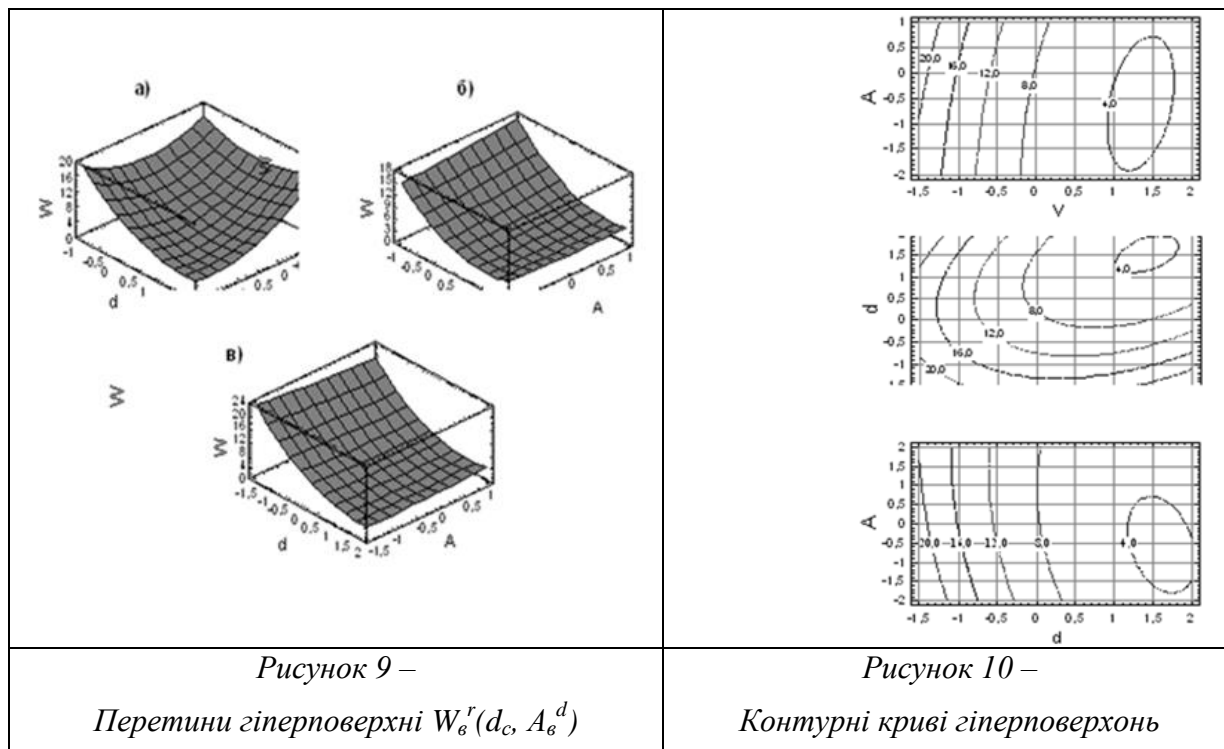
Рисунок 8 – Схема дослідної установки зневоднення вугілля зривом водної плівки ежектуванням: 1 – бункер вихідного вугілля; 2- компресор; 3 – ресивер; 4 – ежектор; 5- бункер-збірник зневодненого шламу; 6 – циклон; 7 – вентилятор

Для одержання регресійної моделі досліджуваного процесу використано центрально-композиційний ротатабельний план другого порядку для трьох факторів, вибраних на основі попередніх досліджень: швидкості струменя повітря $V_{\text{п}}$ на зрізі сопла, середнього діаметра вугільних зерен d_c , зольності вугілля $A_{\text{в}}^{\text{д}}$. В якості вихідного прийнято донецьке вугілля марки Г. Цільова функція – вологість $W_{\text{в}}^{\text{р}}$ зневодненого ежектуванням вугілля. Розробка плану експерименту, визначення значущості коефіцієнтів моделі та її аналіз виконані за допомогою комп'ютерної програми Statgraphics. Одержаний поліном має вигляд:

$$W = 8,52 - 3,29 \cdot V - 3,25 \cdot d + 0,27 \cdot A - 1,69 \cdot V \cdot d - 0,46 \cdot V \cdot A + 0,41 \cdot d \cdot A + 2,06 \cdot V^2 + 1,86 \cdot d^2, \quad (3)$$

Коефіцієнти моделі наведено в нормованому вигляді. Модель адекватна процесу, що досліджується. Про це свідчить високе значення коефіцієнту детермінації. ($R_2 = 96,87\%$). Виконаний аналіз показав, що найбільший вплив на вологість зневодненого продукту має швидкість повітря $V_{\text{п}}$ на зрізі сопла. Майже такий же за значимістю параметр середньої крупності вугілля d_c . Значно менше на цільову функцію впливає зольність вихідного вугільного шламу.

На рис. 9 подані часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції $W_{\text{в}}^{\text{р}}(V_{\text{п}}, d_c)$, $W_{\text{в}}^{\text{р}}(V_{\text{п}}, A_{\text{в}}^{\text{д}})$, $W_{\text{в}}^{\text{р}}(d_c, A_{\text{в}}^{\text{д}})$. На рис. 10 наведені контурні криві цих гіперповерхонь. Як видно з наведених рисунків, зростання швидкості струменя повітря $V_{\text{п}}$ і середнього діаметра зерен d_c в діапазоні значень факторного простору приводить до суттєвого зменшення вологості зневоднюваного вугільного шламу. При цьому спостерігається спочатку різке зниження $W_{\text{в}}^{\text{р}}$ в діапазоні значень $V_{\text{п}}$ від -1 до 0 (50-150 м/с), подальше збільшення швидкості $V_{\text{п}}$ понад 150 м/с дає значно менший ефект впливу на цільову функцію. Крива $W_{\text{в}}^{\text{р}}(V_{\text{п}})_{|d_c > 1,2}$ виположується. Слід зазначити, що у випадку дрібного шламу ($d_c \leq 0,5-0,4$ мм) такого суттєвого впливу швидкості повітряного потоку на вологість зневодненого матеріалу не спостерігається. Це пояснюється злипанням дрібних вугільних часточок в агрегати, які часто не роз'єднуються в газовому потоці і зберігають внутрішню агрегатну вологу (плівкову, капілярну, гравітаційну і т.д.).



Характер кривої $W_B^r(d_c)$ схожий з описаним для $W_B^r(V_{п})$. В діапазоні значень $d_c \geq (0,2 - 0,4) - 1,2$ мм і великих швидкостях струменя повітря $V_{п} = 250-350$ м/с спостерігається різке зменшення вологості зневоднюваного шламу. Для більш крупних частинок, особливо в зоні $d_c \geq 1,5 - 2,2$ мм крива $W_B^r(d_c)|_{V_{п}=250-350 \text{ м/с}}$ виположується. Відмічений характер кривої спостерігається тільки при $V_{п} > 200-250$ м/с. При менших значеннях швидкості вплив крупності вугільних зерен на їх вологість дещо менш значний.

Таким чином, найбільша ефективність методу зневоднення дрібнодисперсного вугілля ежектуванням спостерігається на більш зернистому матеріалі та підвищених швидкостях струменя повітря і ці параметри мають свої границі найбільшого впливу.

Розроблена регресійна модель процесу зневоднення дрібнодисперсного вугілля ежектуванням дозволяє прогнозувати вологість зневодненого матеріалу, показує характер та ступінь впливу на процес основних технологічних факторів, які за своєю значимістю розташовуються в такому ряду: швидкість повітряного струменя на зрізі сопла ежектора – середня крупність вугільного шламу – зольність шламу. Визначені раціональні границі двох найбільш суттєвих факторів процесу: - швидкості повітряного струменя $V_{п} \geq 100$ м/с; - середньої крупності зневоднюваного вугілля $d_c > 0,4-0,5$ мм.

Розробка технологічної схеми і рекомендацій по впровадженню запропонованих технічних рішень. На основі даних експериментальних досліджень розроблена геотехнологія видобутку вугілля на основі суміщення процесів «свердловинний гідродобуток соляного вугілля – гідротранспорт – зневоднення і знесолення».

На завершальних етапах технологічна схема включає осаджувальне центрифугування при підвищеному числі Фруда та наступне глибоке зневоднення ежектуванням. Технологічна схема показана на рис. 11.

Для полігонних досліджень була вибрана центрифуга НОГШ-325 з числом $Fr = 2000$. Для промислового використання пропонується супер Декантер центрифуга Sharples РМ-76,000 з числом $Fr = 2000$ або її вітчизняний аналог з числом Fr більше 1000.

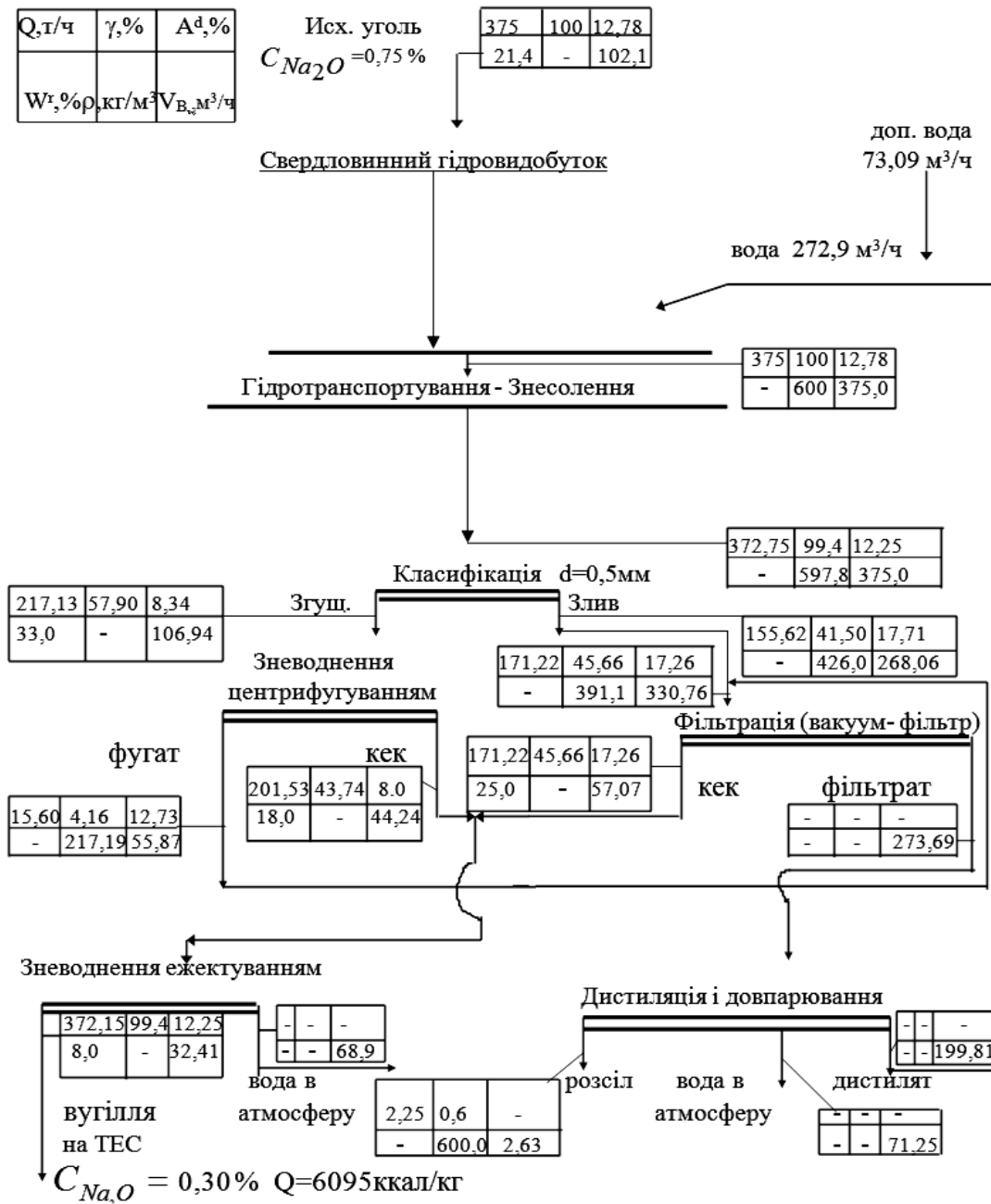


Рисунок 11 - Якісно-кількісна схема знесолення вугілля за суміщеною технологією ПолтНТУ «гідровидобуток – гідротранспорт – знесолення»

Апаратурне забезпечення розробленої технологічної схеми не містить оригінальних апаратів, машин і механізмів і може бути реалізоване на серійному обладнанні, що є безумовною перевагою схеми. Крім того, її перевагою є власне суміщення технологічних процесів, що суттєво спрощує і здешевлює знесолення вугілля.

Розроблена геотехнологія може бути запропонована для впровадження на родовищах засоленого малометаморфізованого вугілля Західного і Північного Донбасу.

Висновки

1. Запропонована суміщена технологія «свердловинний гідровидобуток-гідротранспорт-знесолення» дозволяє в два з половиною рази зменшити вміст солей у

вихідному вугіллі. А саме, якщо вміст у золі вихідного вугілля Na_2O становив 0,75%, то у знесолоному вугіллі зменшився до 0,30%.

2. Апаратурне забезпечення розробленої технологічної схеми не містить оригінальних апаратів, машин і механізмів і може бути реалізоване на серійному обладнанні, що є безумовною перевагою схеми.

3. Розроблена геотехнологія може бути запропонована для впровадження на родовищах засоленого малометаморфізованого вугілля Західного і Північного Донбасу. Запропоновані в роботі технологічні рішення є патентоздатними.

Література

1. Клер В.П., Дик Э.П. Изучение минеральных компонентов энергетических углей. // Разработка и охрана недр. - 1981. №4. - С. 32-35.
2. Афанасенко Л.Я. Исследование характеристик и свойств засоленных углей Донбасса и их изменений при термической обработке. Автореф. дисс. канд. техни. наук.: институт. Киев., 1990. - 20 с.
3. Исследование электрофизических и физикохимических свойств "соленых" углей: Отчет о НИР (промежуточный)/ Институт физикоорганической химии и углехимии АН Украины; руководитель В.И.Саранчук. — № ГР 0185.0013540. — Донецк: 1985 — 82 с.: ил.
4. Методические разработки по изучению соленых углей Западного Донбасса / Пожидаев С.А., Грицай Р.А., Иванова А.В. и др. - Киев: Наукова думка, 1981. - 56 с.
5. Hodges N.J., Ladner W.R., Martin T.G. Clorene in Coal: a Review of its Origin and Mode of Occurrence. // J.Inst.Energy, 1983. №128. p. 58-169.
6. Lehman H. Zur Kenntnis des eozaenen Salzkohlen. // Bergbantechnik, 1967. №7. p. 350-355.
7. Хаушильд М. Котлы для сжигания бурых углей с большим содержанием щелочей в золе. // В кн.: Паровые котлы зарубежных электростанций. М., Л.: Госэнергоиздат, 1959, вып. 1, с. 23-42.
8. Cluskoter H.J. Clorine in Coals of the Illinois Basin. // Transaction of the Society of Mining Engineers, 1967. № 238. p. 373-379.
9. Pellgalli M., Keil G., Klare H. Salzkohle. Chemierohstoff und Energieträger.// Wiss und Fortchr, 1982. №8. p. 316-320.
10. Поведение минеральной части твердых топлив при сжигании их в топках современных котлов. // Теплоэнергетика, 1971. №7. с. 47-52.
11. Влияние минеральной части топлива на работу котлоагрегата. Св. пер. статей /Под ред М.А.Назарова . - М., Л.: Госэнергоиздат, 1959. - 120 с.
12. Симонова В.В. Исследование состава, структуры и свойств соленых углей Западного Донбасса. Автореф. дисс.канд. хим. наук: Донецк. Ин-т. физ. хим. и углехим, 1992. - 121 с.
13. А.В., Зайцева Л.Б. Проблема генезиса соленых углей Западного Донбасса. Киев: 1982. - 35 с.
14. Уланов Н.И. Оценка солености углей Орловского месторождения Турганского бассейна и возможность использования их в качестве энергетического топлива — В кн. VII Всесоюзное угольное совещание (Ростов-на-Дону, сентябрь, 1981 г.): Тезисы доклада, Ростов-на-Дону, 1981, с. 250-252.

15. Гальчиков В.В. Исследование закономерностей распределения щелочных металлов в углях пласта К₂ северной окраины Донецкого бассейна. Диссертация на соискание ученой степени канд. геолого-минералогических наук: - Ростов-на-Дону., 1984. - 179 с.
16. Васянович Ю.А. Научное обоснование эффективности использования технологии скважинной гидродобычи угля в условиях Дальнего Востока. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Владивосток – 1996 г. 27 с.
17. Есина Е.Н. Результаты лабораторных испытаний по скважинной гидродобыче угля. // Горный информационно-аналитический бюллетень . Выпуск № 6 / 2011 . С. 302-306.
18. Шендрик Т.Г., Саранчук В.И. Соленые угли. Донецьк: Східний видавничий дім. - 2003. – 296 с.
19. Соленые угли их генезис и методы изучения / Пожидаев С.Д., Грицай Р.А., Ткаченко Н.П., Савчук В. С., Бойко П.Г. – М.: ВИЭМС. – 1988. – 24 с.
20. Перспективы освоения соленых углей Украины / В. С. Белецкий, С. Д. Пожидаев, А. Кхелуфи, П. В. Сергеев. — Донецьк: ДонГТУ, УКЦентр, Східний видавничий дім — 1998. — 96 с.
21. Симонова В.В. Исследование состава, структуры и свойств соленых углей Западного Донбасса. Автореф. дисс.канд. хим. наук: Донецьк. Ин-т. физ. –орг. хим. и углехимии.1992. - 21 с.
22. Зайковский А.В. Изменение структуры и свойств продуктов щелочного гидролиза соленых углей Западного Донбасса. Автореф. дисс. канд. хим. наук: Донецьк. Ин-т. физ.-орг. хим. и углехимии. 1993, — 19 с.
23. Світлий Ю.Г., Білецький В.С.. Гідравлічний транспорт (монографія). – Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, «Редакція гірничої енциклопедії», 2009. – 436 с.
24. Світлий Ю.Г., Круть О.А. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів. Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.
25. Круть А.А., Світлий Ю. Г. Исследование обессоливания угля а процессе гидро-транспорта. // Уголь Украины, 1984. — № 1. с. 41.
26. Папушин Ю. Л., Смирнов В. О., Білецький В. С. Дослідження корисних копалин на збагачуваність (навчальний посібник). Донецьк: Східний видавничий дім, НТШ-Донецьк — 2006. — 344 стор.
27. Скибенко В.М., Сергеев П.В., Білецький В.С. Аеромеханічне зневоднення дисперсних матеріалів //Збагачення корисних копалин, вип.10 (51), 2000. - с. 92-98.
28. Мала гірнича енциклопедія: в 3 т. / за ред. В.С. Білецького. – Донецьк : Донбас, 2004. – 640 с.
29. Исследование явления вторичного соленакопления в процессе обессоливания углей / В. С. Белецкий, Ю. Г. Світлий, П. В. Сергеев, А. Кхелуфи // Изв. Донец. горного ин-та. – 1998. – № 1. – С.66–69.