



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства
та природокористування

О. С. Стадник, В. О. Гнеушев



ЗБАГАЧУВАНІСТЬ ВИСОКОЗОЛЬНОГО ТОРФУ

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Монографія

Рівне – 2019



Національний університет
водного господарства та
природокористування

УДК 622.7:622.331

C76

Рецензенти:

Білецький В. С., доктор технічних наук, професор, професор кафедри видобування нафти, газу і конденсату Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків);

Мельничук В. Г., доктор геологічних наук, професор, завідувач кафедри геології та гідрогеології Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне);

Олійник Т. А., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри збагачення корисних копалин і хімії ДВНЗ «Криворізький національний університет» (м. Кривий Ріг).

Рекомендовано вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування

Протокол № 7 від 18 грудня 2018 р.

Стадник О. С., Гнеушев В. О.

C76 Збагачуваність високозольного торфу : монографія. — Рівне : НУВГП, 2019. — 163 с.

ISBN 978-966-327-421-8

У монографії розглянуті властивості торфу як об'єкту збагачення, наведені результати досліджень високозольних торфів України по збагачуваності та запропоновані технологічні схеми їх збагачення. Більш детально досліджена збагачуваність високозольного торфу пневматичною сепарацією. Розроблено методика комп'ютерного моделювання роботи пневматичних сепараторів та запропоновані їх нові конструкції.

Книга рекомендована для фахівців і науковців гірничих спеціальностей та торфових виробництв.

УДК 622.7:622.331

ISBN 978-966-327-421-8

© О. С. Стадник, В. О. Гнеушев, 2019

© Національний університет

водного господарства та

природокористування, 2019



ЗМІСТ

Вступ	5
1. Оцінка торфових ресурсів та запасів України, проблема їх зазеленості	7
2. Аналіз сучасного стану торфової промисловості України	16
3. Дослідження речовинного складу високо-зольного торфу	24
3.1. Петрографічний склад високозольного торфу	24
3.2. Хімічний склад органічної та мінеральної частин торфу	31
3.3. Дослідження фізичних властивостей основних петрографічних складових торфу	35
3.4. Вплив вологості та зольності високозольного торфу на його густину	37
4. Дослідження високозольного торфу на збагачуваність	44
4.1 Основні фізико-технічні властивості торфу як палива	44
4.2. Характеристика зразків високозольного торфу використаних при дослідженнях	45
4.3. Макроскопічний аналіз високозольного торфу та особливості його подрібнення	47
4.4. Гранулометричний склад високо зольного торфу ...	50
4.5. Фракційний аналіз високо зольного торфу	58
4.6. Дослідження коефіцієнта тертя частинок високозольного торфу	70
4.7. Збагачуваність високозольного торфу пневматичною сепарацією	72
4.8. Збагачуваність високозольного торфу вібраційною сепарацією	83
4.9. Дослідження впливу вологості торфу на ефективність його пневматичної сепарації	85
5. Удосконалення технології пневматичної сепарації торфу	93



5.1. Аналіз відомих методів та обладнання для сепарації торфу	93
5.2. Аналіз методів розрахунку сепараційних характеристик пневматичної сепарації у висхідних криволінійних потоках	98
5.3. Шляхи вдосконалення конструкції сепаратора типу «Зиг-заг» та методи її аналізу	99
5.4. Моделювання процесу пневматичної сепарації торфу в криволінійному потоці	104
5.5. Експериментальні дослідження сепаратора типу «Зиг-заг» з жалюзійними екранами	120
6. Технологічні схеми збагачення високозольного торфу	123
6.1. Пневмо-вібраційна технологічна схема збагачення високозольного торфу	123
6.2. Обґрунтування технологічної схеми збагачення високозольного торфу при виробництві палив	126
6.3. Схеми збагачення високозольного торфу на виробництвах торфових брикетів та пелет	129
7. Економічний ефект від впровадження технології збагачення високозольного торфу на виробництві палив	137
8. Екологічний аспект використання високозольного торфу	140
8.1. Збереження кондиційних запасів	140
8.2. Зниження емісії парникових газів	141
8.3. Утилізація золи	143
Загальні висновки	144
Додаток	147
Список використаних джерел	151



ВСТУП

Енергетична безпека держави є вагомою складовою частиною її національної безпеки. Вітчизняний паливно-енергетичний комплекс повинен повною мірою забезпечувати країну електричною, тепловою енергією, традиційними і альтернативними енергоресурсами. Одним з вітчизняних альтернативних енергоносіїв є торф.

Торфові ресурси України становлять 2,17 млрд т, балансові запаси – 934 млн т. Річний видобуток торфу в країні складає 0,6–0,7 млн т за умовної вологості 40%. Понад 80% видобутої сировини використовується як паливо. Основною паливною продукцією є торфові брикети та гранули, кусковий та фрезерний торф. Решта торфової сировини використовується для потреб сільського господарства.

Близько 96% торфових запасів України відносяться до низинного типу, якому характерна висока зольність, що обмежує використання цієї сировини як у паливному, так і в інших напрямках. Більше половини балансових запасів торфу України мають зольність понад 23%, тобто є некондиційними за зольністю для виготовлення паливної продукції. Сучасні технології виробництва палив з торфу передбачають зниження зольності лише шихтуванням з кондиційним торфом чи біомасою. Але цей метод обмежується нестачею достатньої кількості кондиційної сировини, потрібної для шихтування. Усунути це обмеження можливо шляхом збагачення некондиційного високозольного торфу. Проте сьогодні процес збагачення високозольного торфу є недостатньо дослідженим. Отже, оцінка збагачуваності високозольних торфів України є актуальним науковим завданням, вирішення якого дозволить залучити до виробництва альтернативного палива значну частину некондиційних за зольністю запасів торфу.

У роботі розглянуті властивості торфу як об'єкту збагачення, наведені результати досліджень збагачуваності високозольних торфів України та запропоновані технологічні схеми збагачення, які дозволяють виготовити кондиційну поливну продукцію з некондиційної сировини. Більш детально досліджена зба-



гачуваність високозольного торфу пневматичною сепарацією та запропоновані нові конструкції пневматичних сепараторів типу «Зиг-заг» зі зменшеною нерівномірністю поля швидкості у робочому об'ємі цих сепараторів. Для вдосконалення конструкції пневматичних сепараторів типу «Зиг-заг» використані сучасні методи комп'ютерного моделювання.

На основі отриманих результатів зі збагачення високозольних торфів родовищ Рівненської та Волинської областей розроблені нові технологічні схеми виробництва торфових гранул та брикетів захищені патентами України.

Автори висловлюють вдячність за цінні поради і консультації під час виконання наукової роботи, результати якої висвітлені в монографії, професору кафедри видобування нафти, газу і конденсату Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» д.т.н., професору Білецькому В.С., науково-педагогічним працівникам кафедри збагачення корисних копалин і хімії ДВНЗ «Криворізький національний університет»: завідувачу кафедри, д.т.н., професору Олійник Т.А., к.т.н., доцентам Булаху О.В., Скляр Л.В. та іншим викладачам.



1. ОЦІНКА ТОРФОВИХ РЕСУРСІВ ТА ЗАПАСІВ УКРАЇНИ, ПРОБЛЕМА ЇХ ЗАЗОЛЕНОСТІ

Геологічні запаси торфу всіх 1564 зареєстрованих торфових родовищ України становлять 2,17 млрд т (у перерахунку на умовну вологість 40%), з них до балансових віднесено близько 934 млн т. Найбільша їх частина зосереджена у Північно-Західному регіоні України [1]. Розподіл торфових запасів за геологічною вивченістю наведений у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Розподіл запасів торфу за геологічною вивченістю [1]

Вид запасів	Категорія запасів за ступенем достовірності оцінки	Запаси, тис. т., при умовній вологості 40%
Балансові	A	515741
	B	4983
	C ₁	142615
	C ₂	270612
	Всього	933952
Позабалансові	P ₁	917196

До категорії A та B належать 55,75% балансових запасів. Вивченість торфових запасів становить 50,45%.

Розподіл торфових запасів по території України нерівномірний, з найбільшою концентрацією у зоні Полісся. Найбільші геологічні запаси торфу знаходяться у Волинській, Рівненській, Чернігівській, Львівській та Київській областях. Розподіл торфових запасів України по адміністративних областях наведено у табл. 1.2. Відповідно до розміщення торфових запасів концентрується і виробництво торфової продукції.

За типами покладів торфові родовища поділяються на низинні, перехідні, верхові та змішані. Розподіл торфових ресурсів України за типами покладів приведений у табл. 1.3.



Таблиця 1.2

Розподіл торфових запасів по адміністративних
областях України [1]

№ з/п	Адміністративні області	Кількість родовищ	Балансові		Забалансові	
			тис. т	%	тис. т	%
1.	Волинська	226	241390	25,8	130506	14,2
2.	Рівненська	332	187747	20,1	173396	18,9
3.	Чернігівська	198	112614	12,1	137304	15,0
4.	Львівська	128	78316	8,4	121659	13,3
5.	Сумська	115	64967	7,0	36489	4,0
6.	Житомирська	187	50990	5,5	32682	3,6
7.	Київська	51	46844	5,0	100955	11,0
8.	Полтавська	49	45490	4,9	24316	2,7
9.	Тернопільська	76	36418	3,9	65683	7,2
10.	Хмельницька	80	31509	3,4	30010	3,3
11.	Черкаська	37	25242	2,7	26863	2,9
12.	Івано-Франківська	35	5370	0,6	7938	0,9
13.	Вінницька	47	4547	0,5	29181	3,2
14.	Херсонська	3	2508	0,3	214	0,0
	ВСЬОГО	1564	933952	100,0	917196	100,0

Таблиця 1.3

Розподіл торфових ресурсів України за типами покладів [1]

Тип покладів	Кількість родовищ	Площа, га	Геологічні запаси, млн т	Геологічні запаси, %
Низинний	2397	608421	2083,1	96,0
Верховий	57	14221	37,9	1,8
Змішаний	9	4150	13,5	0,6
Перехідний	38	12583	34,5	1,6
По Україні	2501	639375	2169	100



Геологічні запаси торфу України на 96% представлені торфовими покладами низинного типу, які формуються, переважно, в заплавах річок. Для заплавних торфових родовищ характерна підвищена зольність торфу і наявність зазелених прошарків [2]. Зольність притерасних заплавних родовищ становить 16-40%. Крім того, у торфових покладах зустрічаються зазелені прошарки, які обмежують видобування покладу під прошарком, або вимагають значних затрат для видалення некондиційної сировини та транспортування її за межі родовища.

За ступенем промислового освоєння запаси торфу поділяються на експлуатаційні, резервні та перспективні. Є також група «решта», до якої входять родовища заповідників і заказників, осушені, зазелені та мілкопокладові [1]. Розподіл запасів торфу по групах наведено у табл. 1.4.

Таблиця 1.4
Розподіл запасів торфу України за групами промислового освоєння [1]

№ з/п	Група запасів	Запаси торфу, тис. т	Частка від запасів, %	Кількість родовищ
1	Експлуатаційні	568855	34,12	502
2	Резервні	142760	8,56	75
3	Перспективні	118455	7,10	75
4	Охоронні	233244	13,99	85
5	Осушені	418476	25,10	398
6	Зазелені	81635	4,90	155
7	Мілкопокладові	103880	6,23	274
Всього		1667305	100,00	1564

Експлуатаційні, резервні та перспективні запаси входять до балансових. Усі запаси групи «решти» – охоронні, зазелені, осушені та мілкопокладові – віднесені до позабалансових запасів. Зазелені запаси торфу в Україні складають 81635 тис. тон (155 родовищ), що становить 4,90% від балансових та позабалансових запасів.



До потенційно зазелених відносяться й запаси торфу родовищ, осушених під сільськогосподарські угіддя. Саме ці родовища викликають найбільший інтерес при організації видобутку торфу, оскільки значно зменшуються витрати на підготовку торфовища до розробки. Проте, на осушених торфових родовищах, які тривалий час не експлуатуються або використовуються як сільськогосподарські угіддя, слід також чекати значного підвищення зольності у верхніх шарах покладу внаслідок мінералізації торфу. Зольність торфового покладу в орному (0-30 см) та підорному (30-60 см) шарах із часом збільшується майже на 30% [3], що робить неможливим використання такої сировини для виготовлення палива та обмежує можливість її застосування в інших напрямках.

Зольність покладу збільшується навіть при використанні торфовищ для видобування торфу. Встановлено [4], що під час розробки фрезерним способом зольність торфу в покладі, у порівнянні з проектною, підвищується на 2,5-9,5%. До причин такого росту зольності відносяться підтоплення родовищ під час весняних та літньо-осінніх повеней, пилові бурі, окиснення торфу та викидання мінеральних речовин на торфовий поклад під час спорудження та прочищення каналів.

На діючих торфопідприємствах підвищена зольність на полях видобування торфу зустрічається при відпрацюванні очисного шару, крайок торфовищ, зазелених прошарків та придонного шару покладу. Особливо висока зольність очисного шару на тих торфових родовищах, які були осушені та використовувались як сільськогосподарські угіддя.

Фото зазелених ділянок полів видобування торфу фрезерним способом на родовищі «Старники» зображено на рис. 1.1.

За діючою класифікацією торфові запаси поділяються на шість підгруп. До першої підгрупи належать запаси із зольністю 0-5,0 %, до другої – 5,1-10,0%, до третьої – 10,1-15,0%, до четвертої – 15,1-23,0%, до п'ятої – 23,1-35,0%, до шостої – 35,1-50% [5]. Ця класифікація зручна для визначення напрямку використання торфу і відповідності торфу вимогам як до сировини для виробництва торфової продукції (табл. 1.5).



Рис. 1.1. Зазолені ділянки полів видобування торфу на родовищі «Старники» (фото О. Стадника та В. Гнеушева)

Таблиця 1.5
Вимоги до сировини по зольності при виборі напрямку використання торфу

№ з/п	Вид продукції	Джерело інформації	Низинний торф	Верховий і перехідний торф
1.	Добриво	[1], [6]	A ^c – до 35%, (25%)	A ^c – до 35%, (25%)
2.	Паливо (торфовий паливний брикет)	[1], [7], [8]	A ^c – до 23%	A ^c – до 23%
3.	Гірничий віск	[1]	A ^c – до 10%	
4.	Дріжджі	[1]	–	A ^c – до 6%
5.	Активоване вугілля	[1]	–	A ^c – до 6%
6.	Підстилка	[1]	A ^c – до 15%	
7.	Горщики та пакувальний матеріал	[1]	A ^c – до 15%	



Вимоги до торфових палив у країнах Європи ще жорсткіші. У Євросоюзі якість біопалив (до яких відносять і торфові палива) регламентується CEN 14961:2005 [9]. За цим стандартом, відповідно до значення зольності, паливу присвоюються марки А2, А4, А6, А8, А10 та А10+, що відповідає зольності $\leq 2\%$, $\leq 4\%$, $\leq 6\%$, $\leq 8\%$, $\leq 10\%$ та $> 10\%$. Якщо зольність палива перевищує 10 %, то у марці вказується конкретне значення цього показника.

За значеннями середньої зольності торфових покладів проаналізовані 76,8% балансових та 72,7% геологічних запасів торфу України. Розподіл балансових та геологічних запасів по підгрупах за середньою зольністю покладів наведений на рис. 1.2 та 1.3. Аналіз показав, що для виробництва паливної продукції непридатними є 52,2% (487,5 млн т) балансових та 50,7% (1100,1 млн т) геологічних торфових запасів.

Можливість використання торфу різних підгруп за зольністю наведено в табл. 1.6.

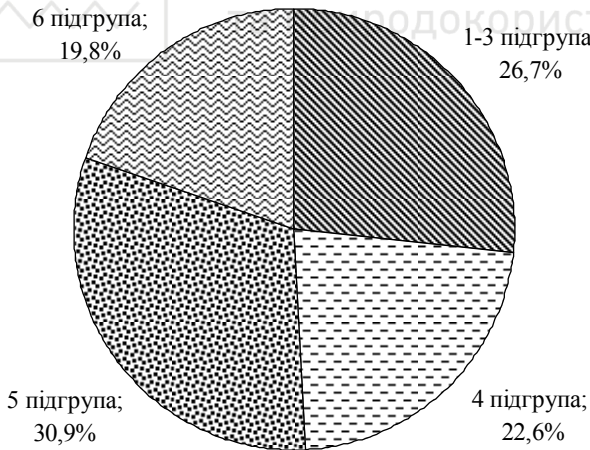


Рис. 1.2. Розподіл балансових торфових запасів за середньою зольністю



Національний університет
водного господарства
та природокористування

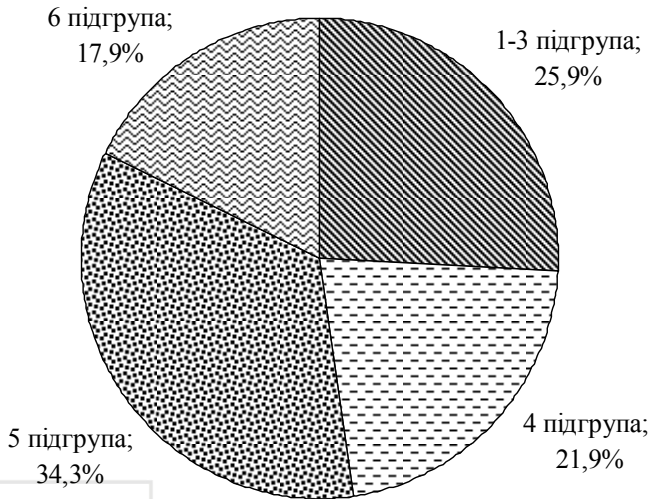


Рис. 1.3. Розподіл геологічних торфових запасів за середньою зольністю

Таблиця 1.6

Можливість використання запасів торфу різних підгруп [10]

Підгрупа	Зольність, %	Частка від геологічних запасів, %	Частка від балансових запасів, %	Можливість використання запасів
1	2	3	4	5
1-3	Менше 15,0%	26,7	25,9	Беззастережне використання для виробництва палива та добрив
4	15,1-23,0%	22,6	21,9	«Група ризику» при виробництві палива і беззастережне використання для виробництва добрив



продовження табл. 1.6

1	2	3	4	5
5	23,1-35,0%	30,9	34,3	Використання для виробництва палива лише після зниження зольності, обмежене використання для виробництва добрив
6	Більше 35,1%	19,8	17,9	Використання для виробництва палива і використання для виробництва добрив після зниження зольності економічно недоцільне
Всього		100,0	100,0	

Серед інших каустобіолітів (кам'яного та бурого вугілля, горючих сланців, нафти, природного газу) тільки торф має здатність до відновлення. На торфових родовищах, збережених у природному стані та заболочених землях річний приріст пласта торфу складає 0,5-1 мм. За розрахунками авторів [11], річний приріст торфових запасів в Україні складає 1,27 млн т/рік, що перевищує обсяг сучасного середньорічного видобутку, роблячи торф відновним ресурсом. Темп відновлюваності торфових ресурсів дозволяє наростити річний видобуток торфу майже удвічі.

Отже, Україна володіє значними запасами торфу, які можуть відігравати більш значну роль в енергетичному балансі країни та знизити її енергетичну залежність від зовнішніх джерел. Проте 50,7% геологічних та 52,2 балансових запасів торфу мають середню зольність покладів вищу 23% що обмежує їх використання майже у всіх можливих напрямках.

Не повною мірою відпрацьовуються і ті торфовища, на яких середня зольність запасів торфу не перевищує 23%, адже придонні шари і окрайки вимушено залишаються невироблени-



ми саме через підвищену зольність торфу на них. Для недопущення згорання виробництва торфової паливної продукції підприємство мусить розпочинати роботу з освоєння нових площ або й іншого торфового родовища, вносячи цим дисбаланс в екосистему регіону, в якій торфовища виконують цілу низку біосферних функцій, значна частина яких є незамінними¹.

Отже, можливість використання високозольного торфу для виробництва кондиційної паливної продукції являє собою актуальну задачу, розв'язання якої веде до розширення ресурсної бази палив і, водночас, є екологічно сприятливим.



¹ Під незамінними біосферними функціями розуміємо ті, що притаманні лише торфовищам, і ніякі інші середовища існування на суші – ліси, луки, степи, сільськогосподарські угіддя не здатні їх виконувати.



2. ІСТОРІЯ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТОРФОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

Історія зародження торфової промисловості сягає XII століття, коли торф почали видобувати у Шотландії та Голландії і використовувати для опалення. З XVI–XVII століття розпочалося видобування торфу у Франції, Швеції та Німеччини [12].

Точна дата початку застосування торфу як палива в Україні невідома, і навряд чи є сенс намагатися її встановити: «займиста земля», вірогідно, горіла ще у вогнищах наших давніх пращурів. Розвиток промислового виробництва спонукав до пошуків дешевих джерел енергії, і наприкінці XVIII – на початку XIX ст. торф починає викликати до себе інтерес як паливо для цукрових, винокурних, цегельних та інших заводів, а також для опалення приміщень. Перші спроби організованого добування торфу на паливо здійснюються в колишніх Чернігівській (1845 р.), Київській, Подільській, Полтавській та Харківській губерніях, у 60-х роках – на Волині, згодом – в інших місцях [13].

Торфова промисловість в Україні організаційно була створена у 1919 році і до другої світової війни розвивалася як переважно паливна галузь, що забезпечувала торфовим паливом теплові електростанції, котельні цукрових та спиртових заводів, комунальні підприємства, школи, лікарні та населення.

Основними видами торфової продукції були кусковий та фрезерний торф. Перший в Україні торфобрикетний цех (продуктивністю 10 тис. т брикетів на рік) був побудований в с. Пиротчине Кролевецького району Сумської області ще до другої світової війни.

Торфова промисловість зіграла значну роль у відбудові народного господарства України після воєнної розрухи. В той час, коли більшість вугільних шахт Донбасу була зруйнована і затоплена, технічний потенціал торфовидобувних підприємств був залучений у роботу вже починаючи з 1943-1944 років. Чимало теплоелектростанцій, цукрових, спиртових заводів та інших промислових об'єктів розпочали свою роботу саме завдяки стабільним поставкам торфового палива.



Обсяги промислового видобутку стрімко зростали: у 1950 році було видобуто 0,5 млн. т, у 1960 – 0,95 млн. т, у 1965 – 6,5 млн т. торфу.

Починаючи з 1950 р. в Україні розгорнулось інтенсивне проектування і будівництво потужних торфобрикетних заводів. У 1955 р. на Житомирщині був введений в експлуатацію Бучманський торфобрикетний завод (ТБЗ). Оснащений комплектом імпортованих пневмопароводяних сушарок (PECO System), завод мав проектну потужність 60 тис. т брикету на рік. Досвід експлуатації цього заводу показав перспективність його технологічної схеми, тому протягом 1960-1963 років у Чернігівській області був побудований Замглайський ТБЗ, який, по суті, являв собою два заводи, аналогічні Бучманському ТБЗ: він був оснащений двома комплектами пневмопароводяних сушарок і пресового обладнання та мав проектну потужність 120 тис. т. Однією з позитивних рис заводів системи «PECO» було те, що вони мали у технологічній схемі власну ТЕЦ, і на сушіння торфу спрямовувалась водяна пара, що відпрацювала свій перший робочий цикл, обертаючи парову турбіну приводу електрогенератора. В такий спосіб вдавалося забезпечувати електричною та тепловою енергією не лише власні потреби заводів, а й потреби сторонніх споживачів, головним чином – селищ, побудованих для працівників заводів.

З використанням цієї ж схеми PECO System були запроєктовані і побудовані: на Львівщині – Стоянівський ТБЗ (1961 р., продуктивність 60 тис. т на рік), а на Житомирщині, у 1969 році, – Озерянський ТБЗ, який мав проектну продуктивність 125 тис. т торфобрикету на рік.

У 1967 році було завершено об'єднання всіх енергосистем України повітряними лініями 220-330 кВ, що підвищило надійність електропостачання споживачів. Ця обставина, у сукупності з низькими тарифами на електроенергію, значною мірою знизила доцільність існування власних ТЕЦ на торфобрикетних заводах. Наслідками стали не лише під'єднання торфобрикетних заводів до об'єднаної енергосистеми та припинення роботи заводських ТЕЦ, а й перегляд концепції вибору технологічної схеми ТБЗ при їх проектуванні. Перевага була віддана паровим



трубчастим сушаркам барабанного типу, які випускала східнонімецька фірма ZEMAG. І хоча основним призначенням цих сушарок є сушіння бурого вугілля, були обґрунтовані сподівання на можливість застосування сушарок ZEMAG для сушіння фрезерного торфу з насипною густиною понад 250 кг/м^3 . Ці сушарки дозволяли знизити металоємність та енергоємність брикетного виробництва і забезпечували належну якість сушіння.

Першим торфобрикетним заводом з сушарками ZEMAG став ТБЗ «Кремінне», пущений в дію в грудні 1974 року в Сарненському районі Рівненської області. На ньому були встановлені дві сушарки, здатні забезпечити річну продуктивність заводу по брикету у кількості 115 тис. т. На жаль, торф родовища «Кремінне» відноситься до переважно перехідного типу, торфокрихта мала низьку насипну густину (в середньому – близько 220 кг/м^3) і не відповідала вимогам сушарки. Інноваційні спроби керівника і спеціалістів заводу збільшити густину сировини шляхом шихтування фрезерного торфу з бурим і розмеленим кам'яним вугіллям були в цілому успішними, але завод так і не вийшов на проектну продуктивність, а після аварії на Чорнобильській АЕС був закритий. Офіційно – через радіаційну забрудненість сировинної бази, фактично – через хронічну збитковість.

Життєздатність схеми виробництва торфобрикетів із застосуванням сушарок ZEMAG була підтверджена на іншому заводі – ТБЗ «Сойне», який, за проектом, був «братом-близнюком» згаданого ТБЗ «Кремінне» і будувався в Маневицькому районі Волинської області. Пуск ТБЗ «Сойне» відбувся у 1983 році. Торф родовищ «Сойне» і «Засвіття-Ситнелюк», які є його сировинними базами, за насипною густиною придатний для сушіння в сушарках ZEMAG, і ТБЗ «Сойне» працює ефективно донині.

В період між 1975 і 1990 роками близько 40% торфових брикетів вироблялися на ТБЗ, оснащених вітчизняними пневмогазовими сушарками. Ці сушарки удосконалювались: на зміну найпростішим пневмогазовим трубам-сушаркам прийшли сушарки з мелючим вентилятором. Саме вони були закладені в про-



екти Ірдинського (Черкаська обл.), Моквинського (Рівненська обл.), Маневицького (Волинська обл.) та деяких інших торфобрикетних заводів продуктивністю до 30 тис. т брикету на рік. Однак показники роботи цих сушарок не виправдали сподівань, і вони були замінені на більш досконалі пневмогазові сушарки з шахтним млином (шахтномлинні сушарки). Саме цей тип сушарок виявився найбільш ефективним: заводи з шахтномлинними сушарками компактні, мають невелику енерго- та матеріалоємність, обладнання просте і недороге у виготовленні та експлуатації.

У 80-х роках минулого століття в Україні стабільно працювали 25 торфобрикетних заводів різної продуктивності, які виробляли близько 1 млн. т торфобрикетів на рік.

Поряд із торфобрикетним виробництвом, у 1980-1990-х роках в Україні значно зросли обсяги видобутку торфу сільськогосподарського призначення – до 20-23 млн т на рік. Більшу частину цього виду торфової продукції (14-15 млн т) видобували механізовані підрозділи «Сільгоспхімії» і 6-8 млн т – промислові підприємства республіканського об'єднання «Укрторф».

Видобуток торфу паливного призначення становив 2,0-2,5 млн т на рік, переважна його частина йшла на переробку для виробництва торфобрикету.

На кінець 1980-х років торфова промисловість України являла собою комплексно механізовану галузь народного господарства, що вирішувала не лише економічні, а й соціальні питання життєдіяльності суспільства. Більшість торфобрикетних заводів побудовані в комплексі з робітничими селищами та всією необхідною інфраструктурою, яка забезпечувала належні умови проживання сімей працівників галузі. Була створена мережа навчальних закладів (ПТУ, технікум, інститут) для підготовки працівників торфової галузі різного рівня кваліфікації – від робітників до інженерів.

Починаючи з 1991 року в Україні розпочався інтенсивний спад торфового виробництва, який був викликаний розширенням газифікації населених пунктів при відносно невисокій ціні на природний газ для населення. Через скасування дотацій на придбання колгоспами і радгоспами торфу для приготування

добрив його закупівля сільгоспвиробниками майже припинилась, а ліквідація сільськогосподарських підприємств колективної і державної форм власності довершила справу згортання видобутку торфу сільськогосподарського призначення. Механізовані підрозділи колишньої «Сільгоспхімії» з видобування торфу на добрива повністю припинили свою діяльність [13].

Сьогодні в Україні торф використовується як місцеве комунально-побутове паливо та для потреб сільського господарства. Динаміку видобутку торфу від 1991 року зображено на рис. 2.1. За останні 25 років видобуток торфу знизився більше ніж у 10 разів з 7,5 млн т – у 1991 році до 0,7 млн т – у 2014 році. Починаючи з 2010 року видобуток торфу становить 500 – 700 тис. т на рік. В останні роки, у зв'язку зі значним подорожчанням природного газу, виникла об'єктивна потреба у його заміні на альтернативні палива, зокрема – й на торфові.

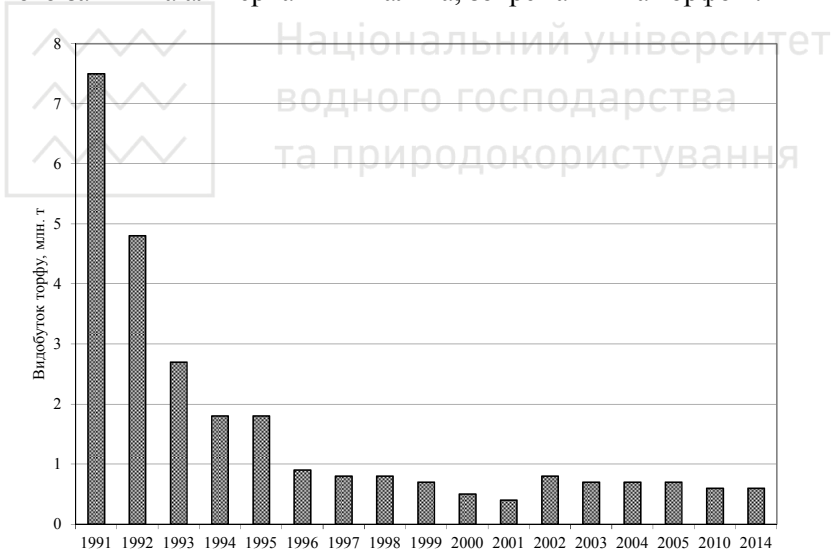


Рис. 2.1. Динаміка видобутку торфу України

З 2012 року, відповідно із змінами у Земельному кодексі України [14] «торфовища з глибиною залягання торфу більше одного метра і осушені незалежно від глибини» відносяться до



особливо цінних земель. Погодження відводу особливо цінних земель провадиться Верховною Радою України за поданням місцевих обласних рад. Існуючий на сьогодні порядок відведення нових торфовищ під розробку не відповідає вимогам часу і унеможливує стабільну роботу підприємств торфової галузі.

Розподіл видобутку торфу між областями зображений на рис. 2.2. Найбільша частка видобутку відноситься до Волинської – 35,63%, Рівненської – 24,90%, Чернігівської – 13,89% та Львівської областей 10,32%. [1; 15]. При сучасних об'ємах видобутку балансових запасів торфу вистачить більше ніж на 1300 років, навіть без урахування відновлення торфових ресурсів. З огляду на це є доцільність нарощувати об'єми видобутку торфу, розвивати виробництво нових видів продукції, таких як гранули на основі торфу (пелети).



Рис. 2.2. Розподіл видобутку торфу між адміністративними областями



Торф в Україні видобувають двома способами – фрезерним та екскаваторним. Видобування торфу фрезерним способом на сьогодні переважає і становить понад 80% від загального видобутку торфу.

Фрезерний спосіб видобування полягає у фрезеруванні (подрібненні та розпушенні) верхнього шару торфового покладу товщиною 10-12 мм. Після фрезерування утворений шар торфвої крихти сушать до вологості 40-50%. Під час польового сушіння виконується одне чи два ворущіння шару, що інтенсифікує процес випаровування вологи. Висушений торф формують у валки, збирають та складують у штабелі. Виконання основних технологічних операцій фрезерного способу видобування: фрезерування, ворущіння, валкування, збирання та штабелювання зображено на рис. 2.3.

У штабелях, безпосередньо на торфовому родовищі, фрезерний торф зберігається до моменту його продажу чи використання для подальшої технологічної переробки. Зі штабелів торф вивозять автомобільним чи залізничним транспортом.



а) фрезерування



б) ворущіння



в) валкування



г) збирання



д) штабелювання

Рис. 2.3. Основні технологічні операції видобування торфу фрезерним способом (фото з джерел [16], [17] та [18])

Фрезерний торф, що має крупність частинок 0-10 мм та вологість – 40-50%, використовують як сировину для виробництва торфових брикетів, для сільськогосподарських цілей, можливе його застосування для виробництва стимуляторів росту рослин та тварин, спиртів, бітумів, гірничого воску.

Експлуатаційний спосіб видобування торфу в даний час використовують обмежено. Він частково замінений фрезформовочним способом отримання кускового паливного торфу (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Вистилання кусків торфу при фрезформовочному способі видобування (фото з джерела [19])



В обох випадках видобутий із покладу торф формується у шматки циліндричного чи призматичного профілю та вистилається на поля для польового сушіння до вологості близько 35-45%. Висушені куски торфу збираються і складуються. Отриманий кусковий торф використовується тільки як паливо.

Отже, при правильній організації використання торфу, він здатен відігравати більш помітну роль як складової частини вітчизняних паливно-енергетичних ресурсів.





3. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЧОВИННОГО СКЛАДУ ВИСОКОЗОЛЬНОГО ТОРФУ

3.1 Петрографічний склад високозольного торфу

Речовину торфу поділяють на три петрографічні складові: рослинні залишки, розкладена речовина (гумус) та самостійні мінеральні компоненти (мінерали наносної чи вторинної золи) [2; 20-22]. Мінеральні мікро- та макроелементи входять і до складу перших двох складових.

Західними дослідниками пропонується розглядати петрографічну будову торфу аналогічно вугіллю [23]. За аналогією із бурим вугіллям, авторами виділено ряд мацеральних груп та проведено їх аналіз. У радянській та вітчизняній науці нашої країни таких поділів не проводилося.

Співвідношення гумусу та нерозкладених рослинних залишків визначається ступенем розкладу торфу. Вітчизняні методики визначення ступеня розкладу відрізняються від західних. **Ступінь розкладу** різних торфів досліджено в джерелах [2; 5; 24]. Розподіл ступеня розкладу по різних класах крупності фрезерного торфу не досліджений, хоча цілком очевидно, що він зростає зі зменшенням класу крупності. Відповідно, у дрібних фракціях торфу має спостерігатися більша частка гумусу. Значення ступеня розкладу для торфів коливаються від 0 до 100%

Кількісне співвідношення між органічною та мінеральною частинами торфу характеризує **зольність**. Частина золи, яку називають материнською або конституційною, міститься у структурі рослин-торфоутворювачів та гумусу [2; 25]. Ця частина золи вивільняється з торфу після спалювання. Мінерали вторинної золи подрібненого торфу можуть знаходитися як у вільному стані, так і в зростках з гумусом, рослинними та деревними залишками. Відомі методики, розроблені зарубіжними вченими для виділення хімічних елементів золи органічного та неорганічного походження. У джерелі [26] наведено приклад такої методики та визначено вмісти Fe (феруму) органічного і неорганічного походження. Зольність торфу може досягати 50%. Органо-



мінеральні корисні копалини із зольністю від 51 до 85% називають органо-мінеральними відкладеннями.

У рослинних залишках і гумусі мінеральні елементи та сполуки знаходяться як у хімічному зв'язку з органічними сполуками, так і у вигляді дрібнодисперсних самостійних мінералів, що утворилися в результаті розкладу рослинних залишків та мінералізації торфу. Зменшення кількості органічної маси торфу внаслідок розкладу рослинних залишків спричиняє підвищення його зольності. Це підтверджується відомими для нормальнозольного торфу рівняннями регресії, які показують пряму залежність зольності від ступеня розкладу [27]. Особливо активно проходить процес мінералізації торфу на осушених торфових родовищах. Це питання висвітлюють автори роботи [3], які засвідчують різке підвищення зольності торфу в орному шарі при сільськогосподарському використанні торфових родовищ.

У процесі розкладу рослинних залишків торфу утворюються дрібнодисперсні мінерали. Це відбувається через відокремлення мінеральних сполук, які перебували у хімічному зв'язку з органічною частиною. Про це свідчить підвищення зольності нормальнозольного торфу у дрібних класах крупності (0-0,25 мм), що чітко проявляється у низинних торфах [28].

Мінерали наносної золи мають теригенне, автогенне чи біогенне походження та належать до таких мінеральних класів:

1. Силікати та алюмосилікати в торфових покладах, представлені кварцом, польовим шпатом, глинистими мінералами та гідролуодою [2; 23; 29]. Всі ці мінерали принесені на родовища поверхневими водами та пиловими бурями.

2. Карбонати, принесені на торфове родовище з підземними водами та внаслідок розкладу живих організмів. Це переважно мергель або луговий вапняк, представлений у вигляді карбонату кальцію (CaCO_3) [2].

3. Оксиди та гідрооксиди в торфових покладах, представлені у вигляді залізної вохри та бурого залізняку. Вони зустрічаються як конкреції, часто з домішками кварцу та глинистих мінералів, що свідчить про їх принесення на торфові родовища з поверхневими водами [2; 23; 29].



4. Фосфати, представлені болотним вівіанітом, який залягає нижче рівня ґрунтових вод. При зниженні рівня ґрунтових вод вівіаніт швидко окислюється і перетворюється в болотний берауніт [6; 30].

Усі мінерали торфу, як дрібнодисперсні, так і наносної золи, після подрібнення знаходяться у вільному стані та у вигляді зростків мінералів з органічною частиною. Ці зростки зв'язані лише механічним зв'язком і руйнуються при додатковому подрібненні торфу та його сушінні. При висиханні зростків торфу відбувається усадка його органічної частини, яка спричиняє збільшення контактних напружень між мінералом та органічною частиною, що супроводжується руйнуванням таких частинок.

Додатковим джерелом золи є вода торфу, яка містить іони неорганічних сполук [27]. Після висихання торфу ці іони кристалізуються у частинки золи.

Хімічні зв'язки органічної та мінеральної частин торфу представлені іонообмінними, гетерополярними та комплексно-гетерополярними органо-мінеральними сполуками [27]. Саме ці сполуки руйнуються при мінералізації торфу.

Якщо розділити золу торфу A на наступні види: зола вільних мінералів $A_{\text{в}}$, зола зростків $A_{\text{зр}}$, зола органо-мінеральних хімічних сполук $A_{\text{х}}$ та дрібнодисперсна зола $A_{\text{д}}$, то можна записати рівняння:

$$A = \frac{A_{\text{в}} \cdot \gamma_{\text{в}} + A_{\text{зр}} \cdot \gamma_{\text{зр}} + A_{\text{х}} \cdot \gamma_{\text{х}} + A_{\text{д}} \cdot \gamma_{\text{д}}}{100}, \% \quad (3.1)$$

де $\gamma_{\text{в}}$, $\gamma_{\text{зр}}$, $\gamma_{\text{х}}$ та $\gamma_{\text{д}}$ – масова частка золи вільних мінералів, зростків, органо-мінеральних хімічних сполук та дрібнодисперсної золи.

Схема зв'язків цих видів золи з органічною частиною торфу зображена на рис. 3.1.

Для зручності запишемо рівняння (3.1) через вилучення золи з вільними мінералами, зростками, хімічними сполуками та дрібнодисперсними частинками:

$$100 = \varepsilon_{\text{в}} + \varepsilon_{\text{зр}} + \varepsilon_{\text{х}} + \varepsilon_{\text{д}}, \% \quad (3.2)$$

де $\varepsilon_{\text{в}}$ – вилучення золи з вільними мінералами, %; $\varepsilon_{\text{зр}}$ – вилучення зі зростками, %; $\varepsilon_{\text{х}}$ – вилучення золи із хімічно-зв'язаними



сполуками, %, ε_d – вилучення золи із дрібнодисперсними мінералами, %.

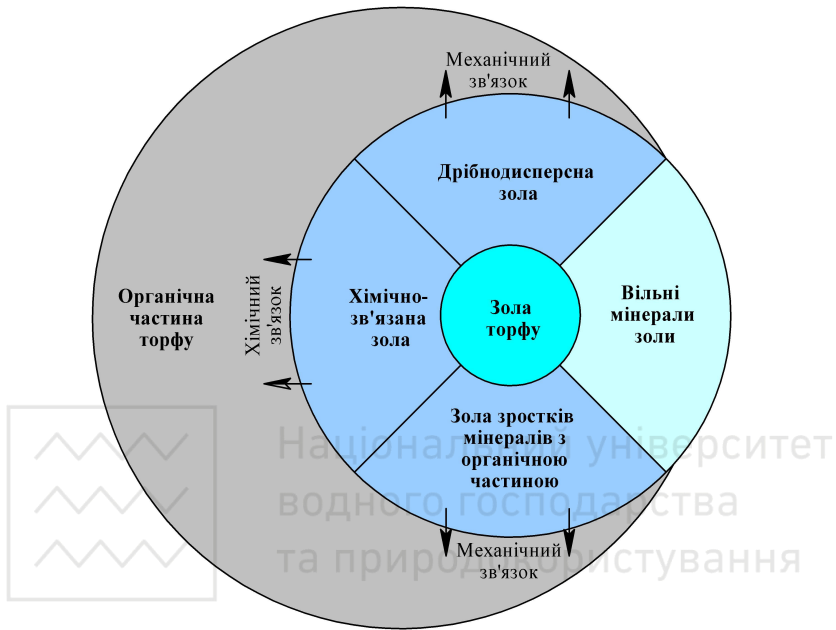


Рис. 3.1. Схема зв'язків різних видів золи з органічною частиною торфу

Для оцінки збагачуваності торфу потрібно обрати методи ідентифікації перерахованих видів золи. Вміст вільних мінералів та зростків мінералів вторинної золи з органічною частиною можна визначити за допомогою розділення у важких рідинах з різною густиною.

Густина мінералів, які знаходяться у торфі, становить 2400 кг/м^3 і більше. Вільні мінерали запропоновано вилучати з торфу у важкій рідині з густиною $2000\text{-}2200 \text{ кг/м}^3$ [29]. При цьому вони виділяються у важку фракцію.

Вилучення золи з вільними мінералами у такому випадку знайдемо за формулою:



$$\varepsilon_{\varepsilon} = \frac{A_{\varepsilon\phi(2100)} \cdot \gamma_{\varepsilon\phi(2100)}}{A}, \%, \quad (3.3)$$

де $A_{\varepsilon\phi(2100)}$ – зольність важкої фракції, яка виділилася у рідині з густиною від 2100 кг/м³, %; $\gamma_{\varepsilon\phi(2100)}$ – масовий вихід важкої фракції у перерахунку на суху речовину, %; A – зольність вихідного торфу.

У зв'язку з тим, що зростки мінералів з органічною частиною торфу при виділенні у важких рідинах руйнуються внаслідок змочування і висихання, то їх слід виділяти разом із вільними мінералами вторинної золи і врахувати це у розрахунках.

Нормальнозольний торф низинного типу має густину сухої речовини від 1460 до 1650 кг/м³. Її значення залежить від зольності та ступеня розкладу торфу [27]. У розрахунках густину сухої речовини торфу можна приймати 1500 кг/м³. Тому зростки мінералів з органічною частиною торфу разом із вільними мінералами при розділенні у рідині з густиною 1500 кг/м³ будуть виділятися у важку фракцію. Вилучення золи із зростками знаходиться за формулою:

$$\varepsilon_{зр} = \frac{A_{\varepsilon\phi1500} \cdot \gamma_{\varepsilon\phi1500}}{A} - \varepsilon_{\varepsilon}, \%, \quad (3.4)$$

де $A_{\varepsilon\phi1500}$ – зольність важкої фракції, яка виділилася у рідині з густиною 1500 кг/м³; $\gamma_{\varepsilon\phi1500}$ – масовий вихід важкої фракції у перерахунку на суху речовину, %.

Легка фракція, яка виділиться при густині розділення 1500 кг/м³, буде представлена органічною частиною торфу з хімічно-зв'язаною та дрібнодисперсною золою. Такий торф за густиною та зольністю є близьким до нормальнозольного. Вилучення золи до легкої фракції визначається за формулою:

$$\varepsilon_{л} = \frac{A_{л\phi1500} \cdot \gamma_{л\phi1500}}{A}, \%, \quad (3.5)$$

де $A_{л\phi1500}$ – зольність легкої фракції, яка виділилася у рідині з густиною 1500 кг/м³; $\gamma_{л\phi1500}$ – масовий вихід легкої фракції у перерахунку на суху речовину, %.

Недоліком розшарування торфу у важких рідинах є неможливість використання цього методу для класів крупності 0-



0,1 мм через переважання сил Стокса. Частинкам торфу та зросткам властиве руйнування та екстракція бітумів при використанні органічних важких рідин, які добре змочують поверхню частинок.

Для виділення груп зростків із різною зольністю та оцінки розкриття мінеральної частини торфу потрібно провести повний фракційний аналіз торфу різних класів крупності, про що детально буде розглянуто у наступному розділі.

Зола легкої фракції, виділена у важкій рідині з густиною 1500 кг/м^3 , у свою чергу складається з хімічно-зв'язаної та дрібнодисперсної золи. Окремо виділити хімічно-зв'язану золу торфу неможливо. Коли розчиняти золу торфу у розчинах кислот (наприклад хлоридної), то у розчин будуть переходити мінеральні сполуки як хімічно-зв'язаної, так і дрібнодисперсної золи. Не розчиняються у розчинах кислот сполуки силікатів та алюмосилікатів.

Наближений вміст хімічно-зв'язаної золи визначається розрахунковим методом із катіонного складу торфу за формулою:

$$\gamma_x = \sum \gamma_k, \% \quad (3.6)$$

де γ_k – вміст відповідних катіонів, %, який розраховується за формулою:

$$\gamma_k = \frac{K \cdot M(K)}{N}, \% \quad (3.7)$$

де K – вміст катіону у торфі, мг.-екв./100 гр. сухої речовини торфу; $M(K)$ – молярна маса хімічного елемента, який відповідає даному катіону гр./моль, N – валентність катіона. Вмісти основних катіонів торфу (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} та Al^{3+}) можна визначати за спеціальними методиками, або прийняти залежно від виду торфу за даними [5].

Вилучення хімічно-зв'язаної золи торфу розраховується за формулою:

$$\varepsilon_x = \frac{100 \cdot \gamma_x}{A}, \% \quad (3.8)$$

Вилучення дрібнодисперсних мінеральних включень визначається по залишковому принципу з формули (3.2):

$$\varepsilon_0 = 100 - (\varepsilon_e + \varepsilon_{zp} + \varepsilon_x), \% \quad (3.9)$$



За експериментальними дослідженнями високозольних торфів родовищ «Засвіття-Ситнелюк» та «Старники» отримано розподіли різних форм золи, наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Розподіл форм золи високозольних торфів
родовищ «Засвіття-Ситнелюк» та «Старники»

Форма золи	Масовий вихід	Зольність	Вилучення
Високозольний торф родовища «Засвіття-Ситнелюк»			
Вільні мінерали	13,82	96,29	47,41
Зола зростків	17,96	30,99	19,83
Зола дрібнодисперсних мінералів та хімічно-зв'язаних сполук	68,22	13,48	32,76
Всього	100	28,07	100
Високозольний торф родовища «Старники»			
Вільні мінерали	10,49	95,25	39,12
Зола зростків	36,17	22,52	31,89
Зола дрібнодисперсних мінералів та хімічно-зв'язаних сполук	53,34	13,88	28,99
Всього	100	25,54	100,00

Виходячи з аналізу основних петрографічних складових торфу та видів зв'язку між органічною та мінеральною частиною встановлено, що потенціалом для збагачення високозольного торфу фізичними методами є мінерали наносної золи та їх зростки.

3.2. Хімічний склад органічної та мінеральної частин високозольного торфу

Хімічний склад торфу поділяють на хімічний склад органічної частини та хімічний склад мінеральної частини.

Розрізняють елементний та груповий хімічний склад органічної частини торфу. Основними елементами органічної части-



ни торфу є карбон, кисень, гідроген, нітроген та сульфур. Елементний склад органічної частини торфів певного типу коливається у незначних межах. Для торфів низинного типу, які характерні для території України, елементний склад органічної частини наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2
Елементний склад горючої маси торфів низинного типу [5]

Елемент	C, %	H, %	N, %	S, %	O, %
Середній вміст	58,0	5,8	2,6	0,52	31,53
Мінімальний вміст	55,6	4,7	0,5	0,12	24,73
Максимальний вміст	63,3	7,0	4,0	4,02	39,52

Основними групами речовин хімічного складу торфу є бітуми (Б), водорозчинні речовини та речовини, що легко гідролізуються (ВР і ЛГ), гумінові речовини (ГР), целюлоза (Ц) та лігнін (Л). Груповий хімічний склад для торфів низинного типу наведений у табл. 3.3.

Таблиця 3.3
Груповий хімічний склад органічної маси торфів
низинного типу [5]

Елемент	Б, %	ВР і ЛГ, %	ГР, %	Ц, %	Л, %
Середній вміст	4,2	25,2	55,5	2,4	12,3
Мінімальний вміст	1,2	9,2	23,6	0	3,3
Максимальний вміст	12,5	45,8	83,4	9,0	26,2

До складу бітумів входять воски, парафіни, асфальтени і масла, тому ці речовини є гідрофобними. Основу водорозчинних речовин та речовин, що легко гідролізуються складають вуглеводи. Гумінові речовини торфу представлені гуміновими кислотами та фульвокислотами. Вони мають велику молекулярну масу 40-300 тис. а.о.м. Молекули гумінових речовин містять значну кількість карбоксильних, метоксильних, гідроксильних та фенольних функціональних груп, що зумовлюють їх високу



реакційну здатність. Ця властивість має важливе значення і використовується при сільськогосподарському використанні торфу. Целюлоза торфу представлена у вигляді нерозкладених тканин рослинних та деревних залишків. Лігнін – це природний полімер, що міститься в оболонках клітин рослин-торфоутворювачів, що представлений речовинами, переважно, ароматичної будови. Лігнін має низьку гідрофільність.

Хімічний склад органічної частини торфу впливає на його нижчу теплоту згорання.

Вміст мінеральної частини торфу чисельно відповідає його зольності. Кількість та склад золи торфу залежить від вмісту та складу мінеральних речовин в рослинах, з яких утворюється торф, та хімічного складу вод, що підживлюють торфове родовище. Розрізняють нормальнозольні та високозольні види торфу. Верхньою межею зольності нормальнозольного низинного торфу є 12%, а верхового – 6%. У промисловій класифікації торфової сировини верхньою межею нормальнозольного торфу прийнято 15%. Зольність торфів коливається в широкому діапазоні і становить для торфу низинного типу 3-18%, перехідного типу – 1,3-10,6% і верхового типу – 0,7-5,4% [5].

Мінеральна частина торфу на 98–99% складається з кремнію, алюмінію, заліза, кальцію, магнію, натрію, фосфору та сірки. Ці елементи називають макроелементами. Розподіл оксидів макроелементів в торфах низинного, перехідного та верхового типів, наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Розподіл оксидів макроелементів в неорганічній частині торфу (на суху речовину) [5; 24]

Тип торфу	SiO ₂ , %	Fe ₂ O ₃ , %	Al ₂ O ₃ , %	CaO, %	P ₂ O ₅ , %
Низинний	1,62 (0,30-8,48)	1,02 (0,01-5,32)	0,51 (0,05-3,01)	2,55 (0,10-6,50)	0,41 (0-0,45)
Перехідний	1,30 (0,37-8,85)	0,55 (0,01-3,05)	0,43 (0,02-1,57)	1,28 (0,13-4,95)	0,09 (0-0,39)
Верховий	1,02 (0,19-7,15)	0,18 (0-2,47)	0,21 (0,02-0,74)	0,54 (0-3,23)	0,07 (0-0,56)

Примітка. В дужках вказані мінімальні та максимальні значення



Макроелементи в торфі знаходяться у структурі органічної частини торфу (материнська зола) та у вигляді мінералів (вторинна зола), властивих осадовим породам, що належать до таких класів: силікати та алюмосилікати, карбонати, оксиди та гідроксиди, фосфати [2; 29]. У літературі материнську золу торфу ще називають конституційною. Вміст материнської золи у різних рослинах-торфоутворювачах та мінералогічний склад вторинної золи досліджено у джерелах [2; 5; 20-23; 27; 29; 31]. Методика визначення вторинної золи відсутня, проте для орієнтовного визначення пропонується розрахунковий метод [4]. Оскільки материнська зола хімічно зв'язана з органічною частиною, її видалення фізичними методами неможливе. Тому збагачення торфу відбувається лише за рахунок видалення мінералів вторинної золи [28].

До мікроелементів торфу належать – Zn, Cu, Mo, Mn, Co, B, Sr. Їх вміст не перевищує десятих часток відсотка.

Високозольний торф, залежно від геоморфологічного розташування родовища, може бути багатий на різні речовини (табл. 3.5). Піщано-глинистий торф багатий на силікати та алюмосилікати, вапняковий – на силікати та карбонати кальцію, віванітовий – на силікати та віваніт ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), охристий – на оксиди та гідроксиди заліза. Сірчистий торф є багатим на усі перераховані мінеральні речовини.

Таблиця 3.5

Хімічний склад високозольних торфів

Високозольний торф	Вміст основних компонентів в золі торфу, % від сухої речовини			
	CaO	P ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
Піщано-глинистий	0,3-5	0,05-2	5-30	0,2-8
Вапняковий	5-20	0,05-2	5-20	1,5-8
Віванітовий	1-5	2-8	5-20	3-15
Охристий	1-5	0,05-2	5-20	5-24
Сірчистий	1-15	0,05-2	5-20	3-15



Хімічний склад золи торфу впливає на її плавкість. Розрізняють золу легкоплавку (температура плавлення менше 1000°C), середньоплавку (температура плавлення $1000\text{-}1200^{\circ}\text{C}$), та важкоплавку (температура плавлення більше 1200°C). Зола торфу низинного типу є легкоплавкою, а верхового – середньоплавкою [24]. З підвищенням вмісту оксиду кальцію температура плавлення золи знижується, а з підвищенням вмісту оксиду кремнію збільшується. Цим пояснюється різниця у плавкості золи торфів низинного та верхового типу: оксид кальцію переважає в торфі низинного типу, а оксид кремнію – у верхових покладах [25]. Легкоплавка зола спричиняє швидке зашлакування робочих елементів котлів [4], її накопичення на поверхнях теплопередачі, різко знижує коефіцієнт корисної дії котлів.

Отже, хімічний склад торфу визначає його енергетичну та експлуатаційну цінність як палива, а також можливість його використання у сільському господарстві, для хімічної переробки та в інших напрямках.

3.3. Властивості основних органічних та мінеральних складових торфу

Для обґрунтування методу збагачення високозольного торфу (пошуку розділової ознаки) розглянуті гравітаційні, магнітні, електричні властивості і переважаючі розміри основних петрографічних складових. У таблиці 3.6. наведені значення середньої густини, питомої магнітної сприйнятливості, питомої електропровідності та крупності основних складових високозольного торфу, вибрані з літературних джерел [2; 5; 27; 30].

Критерій концентрації [32], розрахований з урахуванням найменшої густини шкідливої частинки та найбільшої густини корисної частинки при розділенні у повітряному середовищі перевищує 2,5. Це свідчить про можливість застосування гравітаційних методів збагачення.



Таблиця 3.6

Властивості основних складових високозольного торфу
низинного типу

Назва частини торфу	Назва складової (мінералу, інгредієнту)	Цінність складової (корисна, шкідлива)	Вміст, %	Властивості			
				Середня густина, кг/м ³	Питима магнітна сприйнятливість, м ³ /кг	Питома електропровідність, См/м	Переважаюча крупність, мм
Органічна	Гумус	Корисна	30-80*	600-1000**	Діамагнетик***	Напівпровідник	0-10
	Рослинний залишок	Корисна	0-70*	400-1000**			
	Деревний залишок	Корисна	0-10*	400-1000**			
Мінеральна	Кварц	Шкідлива	2,2-15,8	2650	0,025·10 ⁻⁷	<·10 ⁻¹¹	0,05-1,2
	Польові шпати	Шкідлива		2550	0,63·10 ⁻⁷	<·10 ⁻¹¹	0,1-0,3
	Глинисті мінерали	Шкідлива	0-20	-	Діамагнетик	-	До 0,1 (можуть утворювати мінеральні агрегати)
	Залізна вохра, бурий залізняк	Шкідлива	0-24****	4000	Парамагнетик	-	
	Кальцит, (мергель)	Шкідлива	0-20****	2700	Діамагнетик	<·10 ⁻¹¹	
	Віваніт	Шкідлива	0-30****	-	-	-	

Примітка: * – показник розрахований виходячи зі ступеня розкладу; ** – змінюється залежно від вологості; *** – судячи з відсутності взаємодії у магнітному полі з індукцією 0,9 Тл, органічна речовина торфу є діамагнетиком; **** – значення розраховані виходячи зі вмістів відповідних оксидів хімічного складу мінеральної частини.

Різниця у переважаючих розмірах частинок органічної частини торфу та мінералів вторинної золи також суттєва. Тому для збагачення високозольного торфу можливе застосування класифікації (пневматичної чи вібраційної) в якості операції основного процесу збагачення.

Основною проблемою збагачення торфу є малі розміри мінералів вторинної золи. Вони знаходяться у класі крупності 0-



1 мм [28; 33]. За дослідженнями авторів, основна частина мінералів вторинної золи торффу низинного типу знаходиться ще у дрібнішому класі крупності, а саме 0-0,5 мм [34]. Такі дрібні класи крупності, за аналогією із вугіллям, що є найближчим за властивостями до торффу, не збагачуються і переходять у концентрат [35]. Це не дозволяє ефективно використовувати високопродуктивні сепаратори.

Враховуючи економічний аспект, а саме – великі витрати на сушіння торффу у технологічних процесах видобування та переробки, для його збагачення доцільно застосовувати «сухі» методи: пневматичну сепарацію, вібраційну сепарацію, збагачення за тертям та інші.

3.4. Вплив вологості та зольності торффу на його густину

На поведінку частинок торффу у апаратах сухої сепарації суттєво впливає густина цих частинок, яку визначають такі фактори, як зольність, ступінь розкладу та вологість. Питання аналізу залежності густини від зольності $\rho=f(A)$ є основним при оцінці доцільності «сухих» методів збагачення. У випадку гравітаційного збагачення в рідких середовищах, основну роль відіграє істинна густина торффу ρ , а при сепарації у газових потоках основною є уявна густина частинок торффу ρ_m . Коли частинки торффу не повністю змочилися (рідина не замінила газ у всіх порах), то уявна густина такої частинки ρ' буде знаходитися в межах $\rho > \rho' > \rho_m$.

Густина високозольного торффу (як істинна, так і уявна) залежить від значення його зольності. Запропоновано визначати наближене значення істинної густини торффу та його горючої маси залежно від зольності та ступеня розкладу за емпіричними формулами [27]:

$$\rho_z = 1600 - 3,33R, \text{ кг/м}^3, \quad (3.10)$$

$$\rho = \rho_z(1 + 0,005A), \text{ кг/м}^3, \quad (3.11)$$

$$\rho = 1600 - 3,33R + 8A - 0,0166RA, \text{ кг/м}^3, \quad (3.12)$$

де R – ступінь розкладу торффу, %; A – зольність торффу, %.



За зауваженням авторів роботи [27] ці емпіричні формули дають дещо завищені значення істинної густини. Для більш точного визначення густини використовують дані Костюка М.С., наведені у табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Значення істинної густини сухої речовини торфу низинного типу (в $\text{кг}/\text{м}^3$) за даними Костюка М.С. [27]

Ступінь розкладу, R , %	Зольність, %			
	10	14	18	25
5	1590	1620	1650	1710
10	1570	1600	1630	1690
20	1540	1570	1600	1660
30	1510	1540	1570	1630
40	1480	1500	1550	1610
50	1460	1500	1530	1590

Значення істинної густини торфу, розраховані за формулою (3.12) або визначені за щойно згаданою таблицею, використаємо для вибору густин важких рідин фракційного аналізу. Наприклад, густина, при якій виділяються частки торфу із зольністю 20%, що передбачена нормативним документом [8], становить $1550\text{--}1700 \text{ кг}/\text{м}^3$ залежно від ступеня розкладу торфу. На основі цих даних кожному зразку торфу потрібно розробляти індивідуальну шкалу густин важких рідин для виділення зростків бідних, рядових та багатих мінеральною частиною.

Істинна густина торфу як двохфазної системи, що складається із золи та органічної частини, розраховується за відомою формулою [27]:

$$\rho = \frac{100\rho_3\rho_2}{100\rho_3 - A(\rho_3 - \rho_2)}, \text{ кг}/\text{м}^3, \quad (3.13)$$

де ρ_3 – густина золи, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_2 – густина горючої маси, $\text{кг}/\text{м}^3$; A – зольність торфу, %. Визначимо з формули (2.14) середню густину золи торфу:



$$\rho_3 = \frac{A\rho \cdot \rho_2}{100\rho_2 - \rho(100 - A)}, \text{ кг/м}^3. \quad (3.14)$$

Використавши формули (3.10), (3.14) та дані з табл. 3.6, розрахуємо середні значення густини золи залежно від зольності (рис. 3.3). Підбираємо для отриманих даних рівняння регресії, яка характеризує густину золи залежно від зольності.

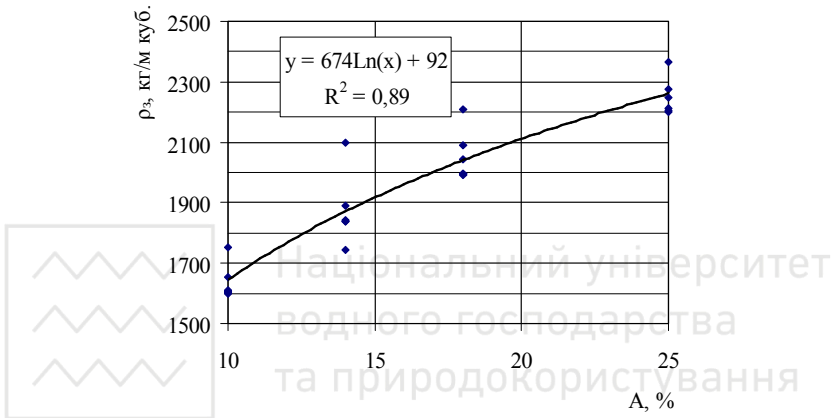


Рис. 3.3. Залежність середньої густини золи торфу від зольності

Коефіцієнт детермінації між значеннями середньої густини та розрахованими за рівнянням регресії становить 0,89, що свідчить про тісний зв'язок. Такий характер зв'язку свідчить про те, що при низькій зольності торфів у складі їх мінеральної частини переважають більш легкі мінеральні сполуки, а при збільшенні зольності – більш важкі (наприклад силікати). При збільшенні зольності торфу густина золи прямує до значень 2400-2600 кг/м³, що відповідає середнім густинам мінералів вторинної золи. Ці дані можна використати для розрахунку густини зростків торфу з мінеральною частиною в обмеженому діапазоні зольностей: від 10 до 25%. Тому доцільно експериментально уточнювати густину мінеральної частини торфу при розрахунках густин зростків.



Уявна густина частинок торфу ρ_m детально досліджена Кісловим М.В. у роботах [37; 38]. За результатами його теоретичних та експериментальних досліджень запропоновані напівемпіричні формули для розрахунку уявної густини частинок торфу в залежності від ступеня розкладу, вологості, коефіцієнтів усадки та переробки і крупності:

$$\rho_m = \rho_{1R\lambda} R^\alpha \left(\frac{d}{d_1} \right)^\beta \left(1 - (1 - k_1) \frac{w}{100} \right)^\delta \lambda^\theta, \text{ кг/м}^3, \quad (3.15)$$

де $\rho_{1R\lambda}$ – густина абсолютно сухих частинок торфу крупністю 1 мм при $R=1\%$ та $\lambda=1 \text{ г/см}^3$, кг/м^3 ; α , β , δ і θ – параметри формул; w – вологість частинки торфу, %; R – ступінь розкладу торфу, %; d – розмір частинок, мм; $d_1=1\text{мм}$; k_1 – коефіцієнт усадки торфу, який залежить від ступеня розкладу. Для низинних торфів зі ступенем розкладу 15-20%, вологістю 25-55% та коефіцієнтом переробки $\lambda=16$ (який характерний для фрезерного торфу) коефіцієнт усадки знаходиться в межах 0,69-0,80. Більш точне значення можна визначити шляхом інтерполяції.

Для торфу з однаковим коефіцієнтом переробки уявна густина частинок розраховується за формулою:

$$\rho_m = \rho_{1R} R^\alpha \left(\frac{d}{d_1} \right)^\beta \left(1 - (1 - k_1) \frac{w}{100} \right)^\delta, \text{ кг/м}^3, \quad (3.16)$$

де ρ_{1R} – густина абсолютно сухих частинок торфу крупністю 1 мм при $R=1\%$, кг/м^3 .

Формули (3.15) та (3.16) отримані для нормальнозольних торфів [36; 37]. Їх недоліком є те, що вони не дозволяють оцінити залежність уявної густини частинок торфу від зольності, оскільки ці формули одержані на підставі даних, отриманих для зразків низинного торфу із зольністю 9-12%.

Для розрахунку уявної густини зростка (частинки із заданою зольністю) умовно розділимо його на дві частини: нормальнозольний торф, виділений з високозольного у важких рідинах, та мінеральну частину. Тоді подрібнений зразок торфу буде складатися з трьох груп частинок: частинки нормальнозольного торфу, вільні мінерали та зростки нормальнозольного торфу з мінералами. Схематично це відображено на рис. 3.4.

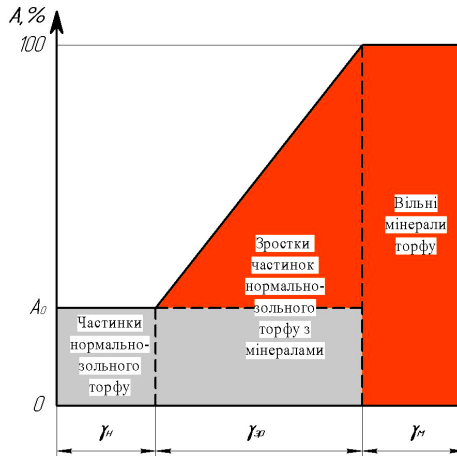


Рис. 3.4. Схема розподілу золи після подрібнення високозольного торфу

Уявну (істинну) густину зростка знайдемо за формулою:

$$\rho_{зр.} = \frac{100\rho_3\rho_m^{A_0}}{100\rho_3 - \gamma_3(\rho_3 - \rho_m^{A_0})}, \text{ кг/м}^3, \quad (3.17)$$

де $\rho_m^{A_0}$ – уявна (істинна) густина частинки торфу із зольністю A_0 , розрахована за формулою (2.16) або (2.17), кг/м^3 ; ρ_3 – середня густина мінеральної частини торфу, кг/м^3 ; γ_3 – масова частка мінеральної частини, яку потрібно додати до нормальнозольного торфу із зольністю A_0 щоб отримати зросток торфу з мінеральною частиною із зольністю A , %.

Оскільки, залежно від генезису торфу, мінеральна частина торфу складається з різних мінералів, то її густина може змінюватись. Тому густину мінеральної частини для кожного зразка торфу потрібно знаходити експериментально. Для цього потрібно виділити зростки торфу зі значною кількістю мінеральної частини, наприклад – при густині важкої рідини 2400 кг/м^3 , спалити важку фракцію у муфельній печі при температурі 800°C для видалення залишків органічної частини та визначити густину



зольного залишку пікнометричним методом. Отримане значення буде відповідати середній густині мінеральної частини ρ_3 .

Зольність нормальнозольного торфу A_0 , який є концентратом відповідного високозольного, приймаємо як зольність легкої фракції, що виділяється при розділенні у важких рідинах з густиною 1500 кг/м^3 .

Масову частку мінеральної частини γ_3 , яку потрібно додати до нормальнозольного торфу із зольністю A_0 , щоб отримати зросток торфу з мінеральною частиною із зольністю A , знайдемо з рівняння балансу за формулою:

$$\gamma_3 = \frac{A - A_0}{100 - A_0} \cdot 100, \%, \quad (3.18)$$

де A – зольність відповідного зростка торфу з мінеральною частиною.

Для використання результатів розрахунку фракційного складу (де визначається істинна густина) для прогнозування показників сухої сепарації (пневматичної, вібраційної) запропоновано коефіцієнт переходу на уявну густину торфу k :

$$k = \frac{\rho_{зпу}}{\rho_{зрі}} = \frac{\rho_{my}^{A_0}}{\rho_{mi}^{A_0}} \cdot \frac{100\rho_3 - \gamma_3(\rho_3 - \rho_{mi}^{A_0})}{100\rho_3 - \gamma_3(\rho_3 - \rho_{my}^{A_0})}, \quad (3.19)$$

де $\rho_{my}^{A_0}$ та $\rho_{mi}^{A_0}$ – уявна та істинна густини частинки торфу із зольністю A_0 , кг/м^3 .

Врахуємо, що відношення уявної до істинної густини нормальнозольного торфу рівне k_0 :

$$k_0 = \frac{\rho_{my}^{A_0}}{\rho_{mi}^{A_0}}. \quad (3.20)$$

Виходячи з цього відношення, формула (2.20) запишеться у такому вигляді:

$$k = k_0 \cdot \frac{100\rho_3 - \gamma_3(\rho_3 - \rho_{mi}^{A_0})}{100\rho_3 - \gamma_3(\rho_3 - k_0 \cdot \rho_{mi}^{A_0})}. \quad (3.21)$$



Нехай k_{01} з врахуванням формул (2.13) та (2.17) дорівнює відношенню:

$$k_{01} = \frac{\rho_{1R} R^\alpha}{1600 - 3,33R + 8A - 0,0166RA}. \quad (3.22)$$

Тоді k_0 можна визначити за формулою:

$$k_0 = k_{01} \cdot \left(\frac{d}{d_1}\right)^\beta \left(1 - (1 - k_1) \frac{w}{100}\right)^\delta. \quad (3.23)$$

Отже, розрахунки з урахуванням запропонованих коефіцієнтів можуть бути використані для попередньої оцінки збагачення високозольного торфу пневматичною сепарацією і покладені в основу методики розрахунку уявної густини частинок торфу заданої крупності в залежності від зольності вологості та ступеня розкладу продукту.





4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЗОЛЬНОГО ТОРФУ НА ЗБАГАЧУВАНІСТЬ

4.1. Основні показники якості торфуг як палива

Основним показником якості торфуг як палива є його нижча теплота згорання. Це комплексний показник, значення якого залежить як від елементного складу торфуг (зі сторони виробника торфових палив не є операціональним²), так і від зольності та вологості. Найбільш керованим показником є вологість торфуг. Досягнення конкретних значень цього показника при осушенні родовища, видобуванні та переробці торфуг описано у відповідних технологічних регламентах. Що ж стосується зольності, то регулювання цього показника дотепер, як вже відмічалось, здійснюється у вузькому діапазоні значень шляхом шихтування. Основним завданням цієї монографії є висвітлення перспективи підвищення керованості фактору зольності в процесі виробництва продукції на основі торфуг.

Зольність характеризує вміст у сухій речовині торфуг негорючих мінеральних речовин і визначається як відношення маси залишку золи після спалювання при температурі 800 °С протягом двох годин у муфельній печі до загальної маси зразка торфуг перерахованої на суху речовину виражене у відсотках A^d . Зольність торфуг визначається за ГОСТ 11306 – 83 «Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности» [38].

Збільшення вмісту золи у паливі знижує його якість, а саме знижує нижчу теплоту згорання та приводить до збільшення кількості відходів після спалювання, які необхідно утилізувати

Вологість характеризує частку вологи у торфі і визначається відношенням маси вологи випаруваної зі зразка при температурі 105 °С протягом чотирьох годин до загальної маси зразка виражене у відсотках ГОСТ 11305 – 83 «Торф. Методы определения влаги» [39].

² Операціональним вважається показник (фактор), який є керованим, тобто таким, для встановлення і підтримки конкретного значення якого відомі зміст і послідовність виконання відповідних операцій.



Збільшення вологості палива також знижує його нижчу теплоту згорання.

Сумарний частка вологи та золи характеризує вміст баластних домішок у паливі, тобто тієї частини, яка при згоранні не виділяє ніякої енергії, а лише частково поглинає її.

Нижчу теплоту згорання палива можна визначити за його елементним складом чи шляхом спалювання аналітичного зразка у калориметричній бомбі за ДСТУ ISO 1928:2006 «Палива тверді мінеральні. Визначення вищої теплоти згорання методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення нижчої теплоти згорання» [40].

Нижча теплота згорання палива за елементним складом розраховується за формулою:

$$Q_n^P = Q_g^P - [6(9H^P + w^P)] \times 4,19, \text{ кДж/кг}, \quad (4.1)$$

де w^P – вологість робочого палива, %; H^P – вміст гідрогену в робочому паливі, %; Q_g^P – вища теплота згорання робочого палива, кДж/кг, яка визначається за формулою Д.І. Менделєєва:

$$Q_g^P = [81C^P + 300H^P - 26(O^P - S^P)] \times 4,19, \text{ кДж/кг}, \quad (4.2)$$

де C^P , H^P , O^P , S^P – вміст карбону, гідрогену, кисню та сульфуру в робочому паливі, %.

Перехід від елементного складу визначеного на горючу масу до робочої виражається формулою:

$$E^P = E^T (1 - 0,01 A^d) (1 - 0,01 w^P), \% \quad (4.3)$$

де E^P , E^T – вміст відповідного елемента (C, H, O, S, N) на робочу та горючу масу відповідно, %; A^d – зольність торфу у перерахунку на суху речовину, %.

Нижча теплота згорання торфових брикетів та пелет становить 14,5-17 МДж/кг, а кускового торфу – 10-12 МДж/кг.

4.2. Характеристика зразків високозольного торфу, використаних при дослідженнях

Для проведення досліджень гранулометричного складу, виконання фракційного аналізу, оцінки розкриття при різних крупностях подрібнення торфу та лабораторних досліджень зі збагачення були відібрані по три зразки високозольного торфу з родовищ «Старники» Дубенського району Рівненської області



та «Засвіття-Ситнелюк» Маневицького району Волинської області. Ці родовища є сировинними базами двох найбільших торфопідприємств України. Зразки відбиралися з трьох штабелів, які відповідають різним ділянкам торфових родовищ, де спостерігається підвищена зольність. Відбір та підготовка зразків для лабораторних досліджень проводилися відповідно до ГОСТ 5396 – 77 [41] та ГОСТ 11304 – 75 [42]. Характеристики відібраних зразків високозольних торфів наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Характеристика зразків високозольних торфів

№ зразка	Назва родовища	Ступінь розкладу, %	Зольність, %	Вологість, %	Походження зразка
1	«Старники»	37	25,28	38,03	Фрезерний торф, відібраний з очисного шару з підвищеною зольністю
2	«Старники»	37	33,09	32,24	Фрезерний торф, відібраний із зазеленого прошарку
3	«Старники»	37	21,96	41,53	Фрезерний торф, відібраний із придонного шару
4	«Засвіття-Ситнелюк»	36	27,35	35,40	Фрезерний торф, відібраний із придонного шару
5	«Засвіття-Ситнелюк»	36	29,65	32,13	
6	«Засвіття-Ситнелюк»	36	28,04	41,54	

За ботанічним складом відібрані зразки торфу належать до низинного типу деревної та деревно-трав'яної групи.

З відібраних зразків були підготовлені усереднені проби високозольних торфів родовищ «Старники» та «Засвіття-Ситнелюк», які використані у подальших дослідженнях збагачуваності.



4.3. Макроскопічний аналіз високозольного торфу та особливості його подрібнення

Основною задачею макроскопічного аналізу високозольного торфу є визначення розкриття мінералів золи при різних крупностях подрібнення та дослідження механізму руйнування частинок торфу у процесі видобування фрезерним способом.

Макроскопічний аналіз класів крупності 0-0,1, 0,1-0,25, 0,25-0,5, 0,5-1, 1-3, 3-5 та +5 мм високозольного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк» виконувався за допомогою мікроскопа Nikon E-300. Знімки, отримані за допомогою фотоголовки мікроскопа наведено на рис. 4.1.

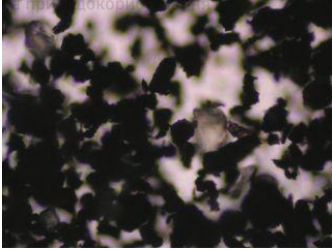
За результатами макроскопічного аналізу встановлено, що в класах крупності 0-0,1, 0,1-0,25, 0,25-0,5, 0,5-1 та 1-3 мм розкриття мінералів золи перевищує 85%. У класах крупності 3-5 та +5 мм вільні мінерали майже відсутні. Тому в технологічних схемах збагачення високозольний торф необхідно подрібнювати до крупності –3 мм.

Механізм розкриття мінералів золи торфу пов'язаний з його фізико-механічними властивостями та технологією фрезерного способу видобування.

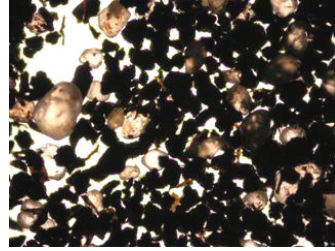
Підготовка до збагачення високозольного торфу при фрезерному способі видобування починається ще на торфовому родовищі. Верхній шар торфового покладу фрезерують (подрібнюють) фрезерними барабанами з утворенням розстилу торфової крихти. Розстил сушиться протягом однієї – двох діб. Для інтенсифікації сушіння виконується два ворущіння розстилу, під час яких торф додатково подрібнюється. У процесі сушіння відбувається об'ємна усадка органічної частини торфу, яка сприяє відшаруванню мінералів золи. Об'єм торфу пропорційний вологовмісту і визначається за формулою С.С. Корчунова [36]:

$$V = V_0(1 + kU), \text{ м}^3, \quad (4.4)$$

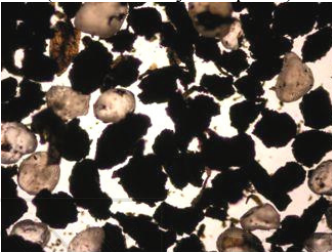
де V_0 – об'єм торфу в абсолютно сухому стані (при вологості рівній нулю); k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від ботанічного складу, ступеня розкладу та ступеня переробки торфу і зростає від 0,04 до 1,5-1,6; U – вологовміст торфу, ч. од.



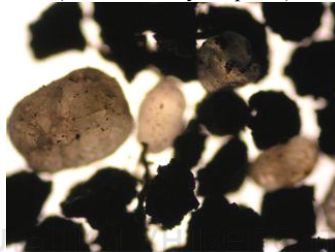
а) клас крупності 0-0,1 мм
(збільшення у 100 разів)



б) клас крупності 0,1-0,25 мм
(збільшення у 40 разів)



в) клас крупності 0,25-0,5 мм
(збільшення у 40 разів)



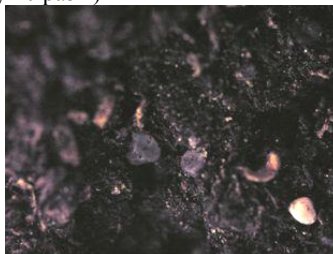
г) клас крупності 0,5-1 мм
(збільшення у 40 разів)



д) клас крупності 1-3 мм
(збільшення у 40 разів)



е) клас крупності 3-5 мм
(збільшення у 40 разів)



е) клас крупності +5 мм (збільшення у 40 разів)

Рис. 4.1. Фото гранулометричних фракцій високозольного фрезерного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк»



Внаслідок усадки об'єм органічної частини торфу у процесі сушіння зменшується у 2-5 разів. При сушінні частинок фрезерного торфу їх пористість збільшується внаслідок виникнення дефектів структури. Дефекти структури утворюються через неоднорідність матеріалу, а саме – наявність мінералів вторинної золи та не розкладених рослинних залишків [43].

На граничній поверхні між мінералами вторинної золи та органічною частиною, внаслідок об'ємної усадки останньої, виникають контактні напруження, які приводять до їх відокремлення. Внаслідок цього ж процесу навколо мінералів вторинної золи утворюються об'ємні дефекти у вигляді тріщин та порожнин, які знижують міцність утримування мінеральних частинок. Тому внаслідок руйнування частинок підсушеного торфу відбувається першочергове вивільнення мінералів вторинної золи (селективне розкриття). Згадані дефекти спостерігаються на фото зломів крупних частинок фрезерного торфу у відбитому світлі (рис. 4.2).

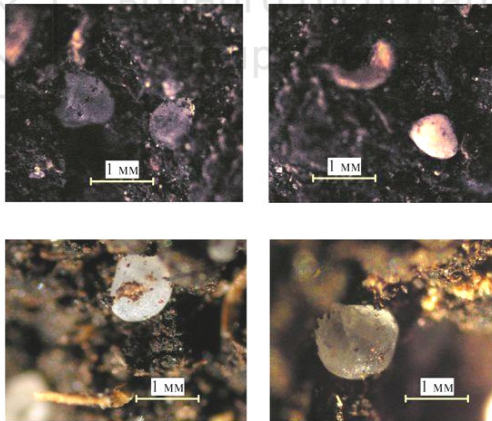


Рис. 4.2. Фото мінералів вторинної золи на зломі підсушеної частинки високозольного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк»

Ділянки зі світлим забарвленням є мінералами вторинної золи, представленими, переважно, кварцом. Порожністі камери



навколо мінеральних частинок виглядають темнішими за органічну частину торфу.

Отже, при подрібненні високозольного торфу до крупності –3 мм досягається розкриття мінералів вторинної золи понад 85%. Завдяки об'ємній усадці органічної частини торфу при сушінні та наступному подрібненні відбувається вибіркове розкриття мінералів вторинної золи з максимальною їх концентрацією у класах крупності 0-1 мм, що відповідають їх розмірам. Це дозволяє збагачувати високозольний торф класифікацією.

4.4. Гранулометричний склад високозольного торфу

Методика дослідження гранулометричного складу високозольного торфу. Гранулометричний склад торфу визначався відповідно до методики ДСТУ 4082 – 2002 [44] та рекомендацій [45] шляхом розсіву на ситах з розмірами чарунок 10, 7, 5, 3, 1, 0,5, 0,25, та 0,1 мм. Оскільки чарунки сит 10, 7, 5, 3 та 1 мм круглі, то для визначення крупності фракцій ці значення множились на коефіцієнт 0,8. У результаті отримано дев'ять класів крупності високозольного фрезерного торфу: +8 мм, 5,6-8 мм, 4-5,6 мм, 2,4-4 мм, 0,8-2,4 мм, 0,5-0,8 мм, 0,25-0,5 мм, 0,1-0,25 мм та 0-0,1 мм. Для кожного з цих класів крупності визначалася вологість та зольність відповідно до ГОСТ 11305 – 83 [39] та ГОСТ 11306 – 83 [38].

Масові виходи кожного з класів крупності з відомим значенням вологості були перераховані на суху речовину фрезерного торфу. Середня вологість та зольність зразка визначалася як середнє динамічне по робочій та сухій масі отриманих класів крупності відповідно. Обробка експериментальних даних виконувалася з використанням кореляційного та регресійного аналізів [46].

Отримані результати представлялися у вигляді залежностей сумарних виходів підрешітного та надрешітного продукту від крупності часток високозольного фрезерного торфу $P_n=f(d)$, $P_n=f(d)$. Також була проаналізована залежність зольності фракцій від середнього розміру частинок гранулометричних фракцій



$A=f(d)$. За результатами цих досліджень оцінена можливість використання класифікації як збагачувальної операції

Результати дослідження гранулометричного складу.

Результати досліджень гранулометричного складу та розподілу зольності по класах крупності високозольних фрезерних та подрібнених у молотковій дробарці до класу крупності –3 мм торфів родовищ „Старники” та „Засвіття-Ситнелюк” наведені у табл. 4.2.

Гранулометричний склад продуктів прийнято представляти у вигляді рівняння Розіна-Рамлера, у вигляді:

$$\gamma_n = 100 \cdot 2^{-\left(\frac{d}{d_m}\right)^n}, \%, \quad (4.5)$$

де γ_n – сумарний вихід надрешітної фракції, %; d – розмір відповідної розрахункової фракції, мм; d_m – розмір медіанної фракції (крупність, при якій масові виходи підрешітного та надрешітного продуктів рівні 50%), мм; n – показник степеня, який залежить від властивостей торфу.

Таблиця 4.2

Гранулометричний склад високозольних торфів родовищ „Старники” та „Засвіття-Ситнелюк”

№ з/п	Клас крупності, мм	Масовий вихід на с.р., %	Зольність, %	Вилучення золи, %	Масовий вихід на с.р., %	Зольність, %	Вилучення золи, %
1	2	3	4	5	6	7	8
		Високозольний фрезерний торф родовища "Засвіття-Ситнелюк"			Високозольний фрезерний торф родовища "Старники"		
1	+8	5,10	22,86	4,11	5,07	21,19	4,01
2	5,6-8	7,09	23,91	5,98	4,91	15,27	2,80
3	4-5,6	8,94	21,27	6,71	6,47	17,00	4,11
4	2,4-4	14,70	20,92	10,85	11,84	18,60	8,22
5	1-2,4	32,98	21,70	25,25	31,31	18,99	22,20
6	0,5-1	7,62	34,45	9,27	6,48	21,76	5,26
7	0,25-0,5	14,82	50,05	26,16	12,45	36,42	16,94
8	0,1-0,25	7,06	42,15	10,50	15,39	53,34	30,65



продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8
9	0-0,1	1,69	19,76	1,18	6,08	25,56	5,80
	Всього	100,00	28,35	100,00	100,00	26,78	100,00
		Високозольний торф родовища "Засвіття-Ситнелюк" класу крупності –3 мм			Високозольний торф родовища "Старники" класу крупності –3 мм		
5	+1	40,36	15,29	21,96	54,31	18,46	37,61
6	0,5-1	7,88	34,44	9,66	11,46	16,34	7,02
7	0,25-0,5	24,63	49,58	43,45	11,83	41,08	18,23
8	0,1-0,25	14,99	29,64	15,81	13,24	59,28	29,44
9	0-0,1	12,14	21,11	9,12	9,16	22,37	7,69
	Всього	100,00	28,10	100,00	100	26,65	100,00

Отримані за експериментами значення коефіцієнта n та медіанного діаметра d_m рівняння Розіна-Рамлера наведені у табл. 4.3.

Графіки залежності сумарних виходів надрешітвого продукту від крупності часток високозольного фрезерного та подрібненого торфу зображено на рис. 4.3 та 4.4.

Таблиця 4.3

Значення коефіцієнта n та медіанного діаметра d_m рівнянь Розіна-Рамлера високозольного торфу

Назва торфового родовища	n	d_m , мм
Високозольний фрезерний торф родовища "Засвіття-Ситнелюк"	1,105	1,840
Високозольний торф родовища "Засвіття-Ситнелюк" класу крупності 0-3 мм	0,885	0,613
Високозольний фрезерний торф родовища "Старники"	0,826	1,242
Високозольний торф родовища "Старники" класу крупності 0-3 мм	0,805	1,028

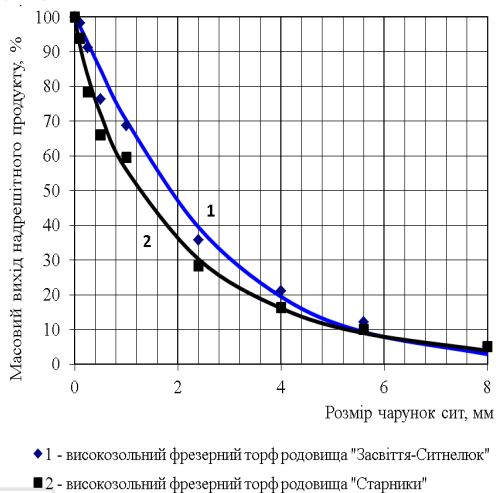


Рис. 4.3. Залежність масового виходу надрешітного продукту фрезерних торфів родовищ «Засвіття-Ситнелюк» та «Старники» від розміру чарунок сит

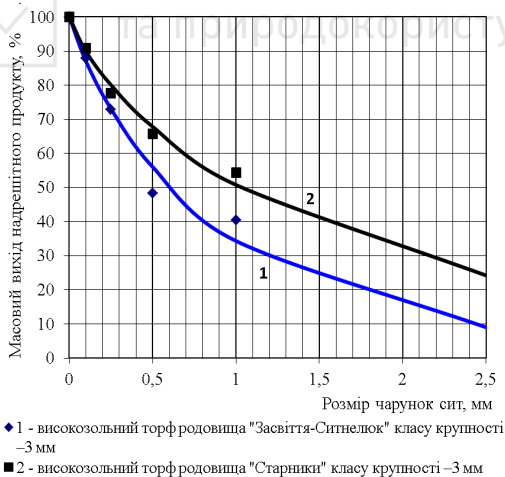


Рис. 4.4. Залежність масового виходу надрешітного продукту подрібнених торфів родовищ «Засвіття-Ситнелюк» та «Старники» від розміру чарунок сит



Розподіл зольності по класах крупності високозольних фрезерних торфів нерівномірний. Зольність класів крупності 0,5-1 мм, 0,25-0,5 мм та 0,1-0,25 мм фрезерного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк» майже удвічі перевищує зольність інших класів крупності. У цих класах крупності зосереджено 45,93% золи від загальної з масовим виходом 29,50%. Зола фрезерного торфу родовища «Старники» зосереджена ще у дрібніших фракціях, з переважанням у класах крупності 0,25-0,5 мм та 0,1-0,25 мм, в яких зосереджено 47,59% золи від сумарної з масовим виходом 27,84%. Максимальну зольність має клас крупності 0,25-0,5 мм високозольного фрезерного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк», та клас крупності 0,1-0,25 мм – родовища «Старники». Вилучення золи у ці класи становить 26,16 та 30,65% з їх масовими виходами 14,82-15,39%, відповідно У цих класах крупності зольність переважно вдвічі вища середньої по зразку.

Після подрібнення високозольних торфів родовищ „Старники” основна частка золи концентрується у класах крупності, властивих відповідним високозольним торфам. Зольність класів крупності +1 мм для подрібненого високозольного торфу родовища „Засвіття-Ситнелюк” та „Старники” знижується до 15,29 та 18,46% відповідно.

Отриманий розподіл зольності за класами крупності високозольного фрезерного та подрібненого торфу відрізняється від нормальнозольного низинного типу, наведеного у [28]. Схематично залежність зольності нормальнозольного торфу від крупності частинок зображено на графіку (рис. 4.5, крива A_0). Лінія A_{0cp} відповідає значенню середньої зольності нормальнозольного торфу.

Характер залежності зольності від крупності частинок високозольного торфу (крива A на рис. 4.5) відрізняється від нормальнозольного. Ця залежність має максимум при певному значенні крупності часток d_0 . Значення d_0 відповідає середній крупності мінералів вторинної золи і має близькі значення для торфів окремих торфових родовищ, що свідчить про близькі умови накопичення цих мінералів у межах родовища. Значення максимального вмісту золи високозольного торфу залежить від умов



подрібнення та різниці між середніми значеннями зольності високозольного та відповідного йому нормальнозольного торфу.

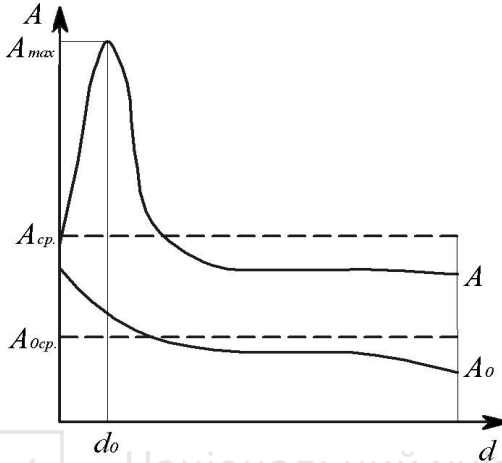


Рис. 4.5. Графік залежності зольності нормальнозольного A_0 та високозольного A фрезерного торфу від крупності часток

Значення зольності елементарного класу крупності високозольного торфу визначається як сума зольності нормальнозольного торфу та зольності, яку додають торфу мінерали вторинної золи:

$$A = A_0 + A_e, \% \quad (4.6)$$

де A_0 – зольність нормальнозольного торфу, який відповідає високозольному, %; A_e – зольність, яку додають торфу мінерали вторинної золи, %. Зольність нормальнозольного торфу можна розрахувати за ступенем розкладу торфу з рівняння регресії [26], чи визначити як зольність легкої фракції, виділеної розшаруванням подрібненого зразка високозольного торфу у важкій рідині з густиною 1500 кг/м^3 . Значення A_0 , отримані при лабораторних дослідженнях, становлять для високозольного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк» 13,48%, родовища «Старники» – 13,88%.

Для апроксимації залежності A_e від крупності частинок була використана функція Гауса, перетворена до наступного вигляду:



$$A_g = ae^{-b(d-d_0)^2} + c, \% \quad (4.7)$$

де a , b та c – емпіричні коефіцієнти; d – крупність частинок, мм; d_0 – крупність частинок, при якій зольність є максимальною. За значення d_0 попередньо приймаємо середній розмір частинок класу крупності, який містить максимальну кількість золи.

Після знаходження емпіричних коефіцієнтів формули (4.7) за допомогою програмного забезпечення MathCad 14, значення d_0 уточнюємо шляхом пошуку мінімального значення середньоквадратичного відхилення від експериментальних даних.

Отримані рівняння регресії наведені у табл. 4.4.

Графіки залежності зольності A від крупності частинок зображені на рис. 4.6-4.7.

Коефіцієнт детермінації для отриманих залежностей знаходиться у межах від 0,84 до 0,98, максимальна відносна похибка визначення зольності становить 23,16%.

Сума отриманих коефіцієнтів a та c рівняння (4.7) відповідає зольності класу крупності, в якому зосереджена максимальна частка золи високозольного торффу.

Таблиця 4.4

Рівняння регресії залежності зольності A від крупності частинок високозольних торфів

Назва торфового родовища	Рівняння регресії	Кореляційне відношення
Високозольний фрезерний торф родовища "Засвіття-Ситнелюк"	$A = 30,2e^{-13,87(d-0,39)^2} + 21,6, \% \quad (4.8 \text{ а})$	0,94
Високозольний торф родовища "Засвіття-Ситнелюк" класу крупності 0–3 мм	$A = 38,8e^{-10,68(d-0,48)^2} + 15,6, \% \quad (4.8 \text{ б})$	0,95
Високозольний фрезерний торф родовища "Старники"	$A = 42,3e^{-47,76(d-0,24)^2} + 18,7, \% \quad (4.8 \text{ в})$	0,96
Високозольний торф родовища "Старники" класу крупності 0–3 мм	$A = 49,7e^{-44,34(d-0,24)^2} + 17,4, \% \quad (4.8 \text{ г})$	0,98

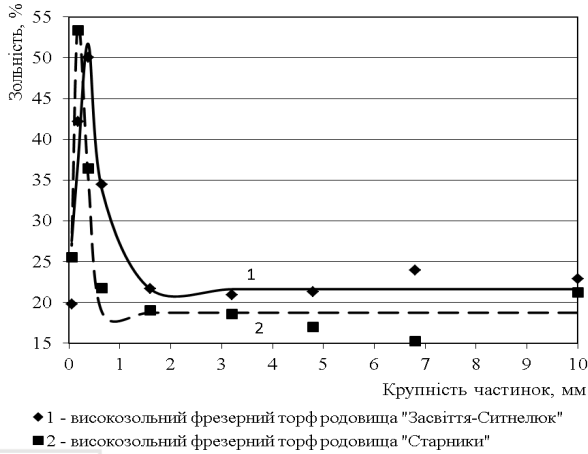


Рис. 4.6. Залежність зольності частинок від їх крупності для високозольного фрезерного торфу



Рис. 4.7. Залежність зольності частинок від їх крупності для подрібненого високозольного торфу



Коефіцієнт c характеризує зольність торфу в крупних класах (+1 мм) і його значення зменшується при подрібненні, що свідчить про збільшення розкриття мінералів золи. Коефіцієнт b характеризує ширину проміжку крупностей, в якому зольність є вищою за середню по зразку.

З результатів гранулометричного складу фрезерного та подрібненого високозольного торфу слідує, що класифікація частинок за крупністю придатна для використання у якості збагачувальної операції.

4.5. Фракційний аналіз високозольного торфу

Фракційний аналіз високозольного торфу проводився для оцінки потенційних технологічних показників збагачення, а саме – отримання максимального виходу концентрату з необхідною зольністю.

Методика фракційного аналізу торфу. Нормативні документи для проведення фракційного аналізу торфу не розроблені, тому в роботі була використана методика, що широко застосовується для інших каустобіолітів, відображена у ДСТУ 3550 – 97 [47]. Додатково враховані властивості торфу, відмінні від інших палив, на які цей стандарт поширюється. До таких властивостей належать:

- здатність торфу поглинати вологу і руйнуватися при цьому;
- екстракція бітумів у органічних розчинниках (про це свідчить забарвлення жовтим чи коричневим кольором розчину, який використовують для фракціонування);
- здатність вступати в реакцію з водними розчинами хлоридів цинку та кальцію (які широко використовуються для фракціонування інших палив) з наступним витісненням іонів кальцію з молекул гумінових речовин.

Для усунення негативного впливу цих властивостей на достовірність результатів аналізу у методиці, відповідно до ДСТУ 3550 – 97 [48], виконані такі додаткові дії:

- зразки торфу були висушені до мінімальної рівноважної вологості, виконане замочування частинок протягом 5-



10 хвилин і одночасне (паралельне) розшарування вихідного зразка у важких рідинах з різною густиною. Ці дії дозволили уникнути руйнування частинок торфу при проведенні аналізу;

– використовувалися лише органічні рідини або їх суміші для розшарування частинок торфу, такі, як чотирихлористий вуглець (тетрахлорметан) та бромформ. Як розчинник використовувався бензол;

– була передбачена можливість врахування екстракції бітумів у тих випадках, коли важка рідина забарвлюється у темно-жовтий чи коричневий колір. Екстрагована масова частка бітумів (на суху речовину) мала додаватися до легкої фракції при розрахунках. Однак в українських низинних торфах, які досліджувалися нами, вміст бітумів був незначний, тому у врахуванні екстракції бітумів необхідності не було.

Перед проведенням аналізу зразки торфу попередньо розшаровувались у важких рідинах для уточнення діапазону густин. У нашому випадку для високозольних торфів низинного типу були вибрані густини 1300, 1400, 1500, 1600 та 1800 кг/м³.

Фракційний аналіз торфу виконувався у такій послідовності:

1. Виконувалося ситування усередненого зразка торфу, відповідно до рекомендацій ДСТУ 4082 – 2002 [44] на ситах із розміром чарунок 10, 5, 3, 1 і 0,1 мм.

2. Отримані продукти розшаровувалися у важких рідинах відповідно до ДСТУ 3550 – 97 [47]. Класи крупності більші 1 мм розшаровувалися у важких рідинах в статичних умовах, клас крупності 0-1 мм розшаровувався у відцентровому полі, а клас крупності 0-0,1 мм не розшаровувався.

Важкі рідини готувалися змішуванням чотирихлористого вуглецю з бензолом або бромформом у об'ємних співвідношеннях, вказаних у табл. 4.5., відповідно до [48]. Після приготування важких рідин їх густини уточнювалися з використанням пікнометра. При необхідності густини коригувалися додаванням бензолу, чотирихлористого вуглецю чи бромформу. Дослід повторювався два рази. За остаточні значення масових виходів фракцій та їх зольностей приймалися середні значення.



Наближене співвідношення важких рідин для приготування
рідини з потрібними густинами

№ з/п	Густина рідини, кг/м ³	Вміст бензолу (C ₆ H ₆), у % по об'єму	Вміст чотирихлористого вуглецю (CCl ₄), у % по об'єму	Вміст бромоброму (CBr ₃), у % по об'єму
1	1300	40	60	-
2	1400	26	74	-
3	1500	11	89	-
4	1600	-	98	2
5	1800	-	79	21

3. Розділення усіх класів крупності у важких рідинах з різною густиною проводилося одночасно. Масовий вихід та зольність проміжних фракцій знаходився розрахунковим шляхом відповідно до ДСТУ 3550 – 97 [47], за відомою формулами:

$$\gamma_{i-(i+1)} = \gamma_{(i+1)} - \gamma_i, \% \quad (4.9)$$

де $\gamma_{i-(i+1)}$ – масовий вихід проміжної фракції, отриманої між i -тою та $(i+1)$ густинами, %; γ_i – масовий вихід фракцій що впливають, отриманий при i -тій густині, %; $\gamma_{(i+1)}$ – масовий вихід фракцій що впливають, отриманий при густині $(i+1)$. У формулу підставлялися дані, які відповідають зростанню густини.

Зольність проміжних фракцій розраховувалася за відомою формулою:

$$A_{i-(i+1)} = \frac{A_{(i+1)} \cdot \gamma_{(i+1)} - A_i \cdot \gamma_i}{\gamma_{(i+1)} - \gamma_i}, \% \quad (4.10)$$

де $A_{i-(i+1)}$ – зольність проміжної фракції, яка отримана між i -тою та $(i+1)$ густинами, %; A_i – зольність фракцій, що впливають, отримана при i -тій густині, %; $\gamma_{(i+1)}$ – зольність фракцій що впливають, отримана при густині $(i+1)$.

4. За отриманими результатами будувалися фракційні характеристики (криві збагачуваності) торфу.

5. Збагачуваність відповідних класів крупності високозольного фрезерного торфу визначалася за значенням параметра T [48], що широко використовується для оцінки збагачуваності



вугілля. При розрахунках густина проміжних фракцій приймалася $1500-1800 \text{ кг/м}^3$, а густина породних фракцій більше 1800 кг/м^3 . Додатково розраховувалися значення ефективності розділення за формулою Льюкена-Хенкока. За отриманими значеннями будувався графік залежності ефективності розділення від густини середовища.

За результатами п.п. 4-5 оцінювалися граничні показники збагачення торфу та розкриття його мінеральної частини у різних класах крупності.

Результати фракційного аналізу.

Результати фракційних аналізів зразків високозольних фрезерних торфів родовищ «Засвіття-Ситнелюк» та «Старники» різних класів крупності наведено в табл. 4.6 та 4.7.

Таблиця 4.6

Фракційний склад високозольного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк»

Густина фракції ($\times 10^{-3}$), кг/м^3	Вихідний торф			Фракції, що спливають		Фракції, що тонуть	
	вихід у % від		зольність, %	вихід, %	зольність, %	вихід, %	зольність, %
	вихідного	класу крупності					
1	2	3	4	5	6	7	8
Клас крупності +4 мм							
<1,3	2,74	11,21	7,85	11,21	7,85	100,00	23,55
1,3-1,4	10,78	44,12	9,82	55,33	9,42	88,79	25,53
1,4-1,5	3,22	13,16	14,62	68,49	10,42	44,67	41,05
1,5-1,6	2,36	9,65	27,02	78,14	12,47	31,51	52,09
1,6-1,8	0,91	3,73	47,81	81,87	14,08	21,86	63,16
>1,8	4,43	18,13	66,31	100,00	23,55	18,13	66,31
Всього	24,44	100,00	23,55				
Клас крупності 2,4-4 мм							
<1,3	1,55	9,73	8,94	9,73	8,94	100,00	17,96
1,3-1,4	6,75	42,46	9,48	52,19	9,38	90,27	18,93
1,4-1,5	2,38	14,94	14,59	67,13	10,54	47,81	27,33
1,5-1,6	1,80	11,31	15,67	78,44	11,28	32,87	33,11
1,6-1,8	2,18	13,69	26,62	92,13	13,56	21,56	42,26



продовження табл. 4.6

1	2	3	4	5	6	7	8
>1,8	1,25	7,87	69,47	100,00	17,96	7,87	69,47
Всього	15,90	100,00	17,96				
Клас крупності 1–2,4 мм							
<1,3	2,48	8,21	8,27	8,21	8,27	100,00	18,15
1,3-1,4	15,36	50,95	9,25	59,16	9,11	91,79	19,03
1,4-1,5	4,54	15,06	13,84	74,22	10,07	40,84	31,25
1,5-1,6	2,53	8,39	17,75	82,61	10,85	25,78	41,41
1,6-1,8	2,99	9,93	32,19	92,54	13,14	17,39	52,83
>1,8	2,25	7,46	80,30	100,00	18,15	7,46	80,30
Всього	30,15	100,00	18,15				
Клас крупності 0,5–1 мм							
<1,3	0,43	8,28	9,41	8,28	9,41	100,00	36,08
1,3-1,4	1,11	21,18	10,62	29,46	10,28	91,72	38,49
1,4-1,5	1,02	19,48	12,01	48,94	10,97	70,54	46,85
1,5-1,6	0,43	8,24	21,52	57,18	12,49	51,06	60,15
1,6-1,8	0,67	12,84	32,23	70,02	16,11	42,82	67,58
>1,8	1,57	29,98	82,72	100,00	36,08	29,98	82,72
Всього	5,24	100,00	36,08				
Клас крупності 0,1–0,5 мм							
<1,3	3,60	16,13	11,28	16,13	11,28	100,00	49,50
1,3-1,4	1,16	5,21	12,10	21,34	11,48	83,87	56,85
1,4-1,5	5,11	22,93	13,97	44,27	12,77	78,66	59,81
1,5-1,6	1,24	5,57	19,12	49,84	13,48	55,73	78,68
1,6-1,8	1,80	8,05	40,88	57,89	17,29	50,16	85,29
>1,8	9,39	42,11	93,78	100,00	49,50	42,11	93,78
Всього	22,30	100,00	49,5				

Граничні показники збагачення (зольність та вихід концентрату і вилучення горючої маси до концентрату) визначалися за кривими збагачуваності з двох умов:

– з умови максимальної ефективності по Люйкену-Хенкоку;

– з умови отримання зольності концентрату 18%. При цьому запас по зольності приймався 2%, оскільки зольність торфової сировини для виробництва палива не повинна перевищувати 20% [8].



Клас крупності +4 мм високозольного фрезерного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк» має зольність, нижчу середньої. Основними носіями вторинних зольних включень є цементовані глинами мінерали та частинки торфу. Критерій збагачуваності T становить 16,34%, що свідчить про дуже важку збагачуваність зразка. Максимальна ефективність розділення по Люйкену-Хенкоку становить 43,96% при густині розділення 1550 кг/м³. При цих значеннях зольність концентрату становить 12,47% з виходом 78,14% та вилученням горючої маси до концентрату 89,76%. Вихід концентрату із зольністю 18% становить 90% із вилученням горючої маси до концентрату 96,85%.

Клас крупності 2,4-4 мм високозольного фрезерного торфу також має зольність, нижчу середньої. Основними носіями вторинних зольних включень є зростки мінералів та частинок торфу. Критерій збагачуваності T становить 27,14%, що свідчить про дуже важку збагачуваність зразка. Максимальна ефективність розділення по Люйкену-Хенкоку становить 31,51% при густині розділення 1700 кг/м³. При цих значеннях зольність концентрату становить 13,56% з виходом 92,13% та вилученням горючої маси до концентрату 97,07%. Зольність усього зразка нижча 18%, тому при отриманні концентрату такої якості клас крупності 2,4-4 мм збагачувати не потрібно.

Клас крупності 1-2,4 мм високозольного фрезерного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк» має зольність, нижчу середньої. Основними носіями вторинних зольних включень є вільні мінерали. Критерій збагачуваності T становить 19,80%, що свідчить про дуже важку збагачуваність зразка. Максимальна ефективність розділення по Люйкену-Хенкоку становить 36,15% при густині розділення 1700 кг/м³. При цих значеннях зольність концентрату становить 13,14% з виходом 92,54% та вилученням горючої маси до концентрату 98,20%. Зольність усього зразка становить 18,15%, тому при отриманні концентрату із зольністю 18% клас крупності 1-2,4 мм також можна не збагачувати.

Клас крупності 0,5-1 мм високозольного фрезерного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк» має зольність, вищу се-



редньої. Основними носіями вторинних зольних включень є, переважно, вільні мінерали. Критерій збагачуваності T становить 30,11%, що свідчить про дуже важку збагачуваність зразка. Максимальна ефективність розділення по Льюкену-Хенкоку становить 51,75% при густині розділення більше 1800 кг/м^3 . При цих значеннях зольність концентрату становить 16,11% з виходом 70,02% та вилученням горючої маси до концентрату 91,90%. Вихід концентрату із зольністю 18% становить 74% з вилученням горючої маси до концентрату 94,93%.

Клас крупності 0,1-0,5 мм високозольного фрезерного торфу має зольність, вищу середньої. Основними носіями вторинних зольних включень є вільні мінерали. Критерій збагачуваності T становить 23,53%, що свідчить про дуже важку збагачуваність зразка. Максимальна ефективність розділення по Льюкену-Хенкоку становить 59,54% при густині розділення більше 1800 кг/м^3 . При цих значеннях зольність концентрату становить 17,29% з виходом 57,89% та вилученням горючої маси до концентрату 94,81%. Вихід концентрату із зольністю 18% становить 59% з вилученням горючої маси до концентрату 95,80%.

Класи крупності +4 мм та 2,4-4+ мм розкриті недостатньо, тому при підготовці сировини до збагачення їх потрібно додатково подрібнювати. Мінерали вторинної золи класів крупності 1-2,4 мм, 0,5-1 мм та 0,1-0,5 мм розкриті майже на 100%, тому ці класи додатково подрібнювати не потрібно.

Таблиця 4.7

Фракційний склад високозольного торфу родовища «Старники»

Густина фракції ($\times 10^{-3}$), кг/м^3	Вихідний торф			Фракції, що спливають		Фракції, що тонуть	
	вихід у % від		зольність, %	вихід, %	зольність, %	вихід, %	зольність, %
	вихідного	класу крупності					
1	2	3	4	5	6	7	8
Клас крупності +4 мм							
<1,3	1,55	12,42	8,17	12,42	8,17	100,00	16,49
1,3-1,4	5,70	45,75	9,94	58,17	9,56	87,58	17,67



продовження табл. 4.7

1	2	3	4	5	6	7	8
1,4-1,5	1,67	13,43	12,60	71,60	10,13	41,83	26,13
1,5-1,6	1,27	10,18	13,02	81,78	10,49	28,40	32,52
1,6-1,8	1,04	8,36	30,55	90,14	12,35	18,22	43,42
>1,8	1,23	9,86	54,34	100,00	16,49	9,86	54,34
Всього	12,46	100,00	16,49				
Клас крупності 2,4-4 мм							
<1,3	0,96	10,46	9,27	10,46	9,27	100,00	21,56
1,3-1,4	3,77	40,97	9,46	51,43	9,42	89,54	23,00
1,4-1,5	1,54	16,71	13,78	68,14	10,49	48,57	34,41
1,5-1,6	0,86	9,40	20,88	77,54	11,75	31,86	45,24
1,6-1,8	0,86	9,38	37,05	86,92	14,48	22,46	55,43
>1,8	1,20	13,08	68,61	100,00	21,56	13,08	68,61
Всього	9,20	100,00	21,56				
Клас крупності 1-2,4 мм							
<1,3	1,91	9,16	8,21	9,16	8,21	100,00	17,95
1,3-1,4	10,31	49,31	9,36	58,47	9,18	90,84	18,93
1,4-1,5	2,93	14,02	12,80	72,49	9,88	41,53	30,30
1,5-1,6	1,89	9,04	19,62	81,53	10,96	27,51	39,21
1,6-1,8	2,40	11,50	28,27	93,03	13,10	18,47	48,81
>1,8	1,46	6,97	82,68	100,00	17,95	6,97	82,68
Всього	20,90	100,00	17,95				
Клас крупності 0,5-1 мм							
<1,3	0,96	10,35	9,84	10,35	9,84	100,00	21,28
1,3-1,4	2,13	22,89	10,26	33,24	10,13	89,65	22,60
1,4-1,5	1,34	14,45	13,60	47,69	11,18	66,76	26,83
1,5-1,6	0,99	10,65	13,97	58,34	11,69	52,31	30,49
1,6-1,8	3,06	32,89	20,51	91,23	14,87	41,66	34,71
>1,8	0,81	8,77	87,96	100,00	21,28	8,77	87,96
Всього	9,29	100,00	21,28				
Клас крупності 0,1-0,5 мм							
<1,3	6,10	15,83	11,52	15,83	11,52	100,00	34,18
1,3-1,4	2,94	7,62	12,26	23,45	11,76	84,17	38,44
1,4-1,5	8,86	23,00	13,74	46,45	12,74	76,55	41,05
1,5-1,6	3,35	8,69	15,85	55,14	13,23	53,55	52,78
1,6-1,8	8,05	20,90	26,69	76,04	16,93	44,86	59,93
>1,8	9,23	23,96	88,92	100,00	34,18	23,96	88,92
Всього	38,52	100,00	34,18				



Клас крупності +4 мм високозольного фрезерного торфу родовища «Старники» має зольність, нижчу середньої. Основними носіями вторинних зольних включень є зцементовані глинами мінерали та частинки торфу. Критерій збагачуваності T становить 20,57%, що свідчить про дуже важку збагачуваність зразка. Максимальна ефективність розділення по Люйкену-Хенкоку становить 31,78% при густині розділення 1700 кг/м³. При цих значеннях зольність концентрату становить 12,35% з виходом 90,14% та вилученням горючої маси до концентрату 94,61%. Зольність усього зразка нижча 18%, тому при отриманні концентрату такої якості клас крупності +4 мм збагачувати не потрібно.

Клас крупності 2,4-4 мм високозольного фрезерного торфу родовища «Старники» має зольність, нижчу середньої. Основними носіями вторинних зольних включень є зростки мінералів та частинок торфу. Критерій збагачуваності T становить 21,61%, що свідчить про дуже важку збагачуваність зразка. Максимальна ефективність розділення по Люйкену-Хенкоку становить 39,67% при густині розділення 1700 кг/м³. При цих значеннях зольність концентрату становить 14,48%, з виходом 86,92% та вилученням горючої маси до концентрату 94,77%. Вихід концентрату із зольністю 18% становить 95% із вилученням горючої маси до концентрату 99,31%.

Клас крупності 1-2,4 мм високозольного фрезерного торфу родовища «Старники» має зольність, нижчу середньої. Основними носіями вторинних зольних включень є, переважно, вільні мінерали і, частково, їх зростки. Критерій збагачуваності T становить 22,08%, що свідчить про дуже важку збагачуваність зразка. Максимальна ефективність розділення по Люйкену-Хенкоку становить 35,45% при густині розділення 1550 кг/м³. При цих значеннях зольність концентрату становить 10,96% з виходом 81,53% та вилученням горючої маси до концентрату 88,48%. Зольність усього зразка нижча 18%, тому при отриманні концентрату такої якості клас крупності 1-2,4 мм збагачувати не потрібно.



Клас крупності 0,5-1 мм високозольного фрезерного торфу родовища «Старники» має зольність, нижчу середньої. Основними носіями вторинних зольних включень є вільні мінерали. Критерій збагачуваності T становить 47,73%, що свідчить про дуже важку збагачуваність зразка. Максимальна ефективність розділення по Льюкену-Хенкоку становить 30,57% при густині розділення більше 1800 кг/м^3 . При цих значеннях зольність концентрату становить 14,87% з виходом 91,23% та вилученням горючої маси до концентрату 98,66%. Вихід концентрату із зольністю 18% становить 95,5% з вилученням горючої маси до концентрату 98,48%.

Клас крупності 0,1-0,5 мм високозольного фрезерного торфу родовища «Старники» має зольність, вищу середньої. Основними носіями вторинних зольних включень є, переважно, вільні мінерали. Критерій збагачуваності T становить 38,91%, що свідчить про дуже важку збагачуваність зразка. Максимальна ефективність розділення по Льюкену-Хенкоку становить 48,85% при густині розділення більше 1800 кг/м^3 . При цих значеннях зольність концентрату становить 16,93% з виходом 76,04% та вилученням горючої маси до концентрату 95,97%. Вихід концентрату із зольністю 18% становить 78% з вилученням горючої маси до концентрату 97,17%.

Практично вся зола класів крупності +4 мм та 2,4-4 мм міститься у зростках, тому їх потрібно додатково подрібнювати. Усі класи крупності обох зразків торфу мають дуже важку збагачуваність, визначену за шкалою, загальноприйнятою для вугілля.

Для встановлення залежності зольності від густини та середньої крупності елементарних фракцій високозольних фрезерних торфів родовищ «Засвіття-Ситнелюк» та «Старники» отримане рівняння регресії:

$$A = 203,0 - 318,2\rho + 6,0d - 4,2\rho \cdot d + 129,3\rho^2, \% \quad (4.11)$$

де ρ – густина елементарної фракції, т/м^3 ; d – середній розмір частинок елементарної фракції, мм.

Кореляційне відношення для отриманого рівняння регресії становить 0,98, середньоквадратичне відхилення – 5,18%.



За результатами фракційного аналізу визначені також сумарні фракційні характеристики обох зразків високозольних торфів, наведені у табл. 4.8, та криві збагачуваності, зображені на рис. 4.8 та 4.9.

Таблиця 4.8

Сумарний фракційний склад високозольних фрезерних торфів

Густина фракції ($\times 10^{-3}$), кг/м^3	Вихідний торф		Фракції, що спливають		Фракції, що тонуть	
	вихід, %	зольність, %	вихід, %	зольність, %	вихід, %	зольність, %
Високозольний торф родовища «Засвіття-Ситнелюк»						
<1,3	10,69	9,32	10,69	9,32	100,00	27,60
1,3-1,4	34,72	9,60	45,41	9,54	89,31	29,78
1,4-1,5	16,12	14,03	61,53	10,71	54,59	42,62
1,5-1,6	8,28	20,22	69,81	11,84	38,47	54,60
1,6-1,8	8,51	34,22	78,32	14,27	30,19	64,03
>1,8	21,68	75,73	100,00	27,60	21,68	75,73
Всього	100,00	27,60				
Високозольний торф родовища «Старники»						
<1,3	12,70	10,19	12,70	10,19	100,00	25,37
1,3-1,4	27,49	9,93	40,19	10,01	87,30	27,58
1,4-1,5	18,08	13,45	58,27	11,08	59,81	35,69
1,5-1,6	9,25	16,57	67,52	11,83	41,73	45,33
1,6-1,8	17,06	26,55	84,59	14,80	32,48	53,52
>1,8	15,41	83,38	100,00	25,37	15,41	83,38
Всього	100,00	25,37				

За сумарними фракційними характеристиками критерій збагачуваності T торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк» становить 21,44%, що свідчить про дуже важку збагачуваність зразка. Максимальна ефективність розділення по Льюкену-Хенкоку становить 47,95% при густині розділення більше 1700 кг/м^3 . При цих значеннях зольність концентрату становить 14,27% з виходом 78,22% та вилученням горючої маси до концентрату 92,62%. Вихід концентрату із зольністю 18% становить 86% з вилученням горючої маси до концентрату 97,40%.

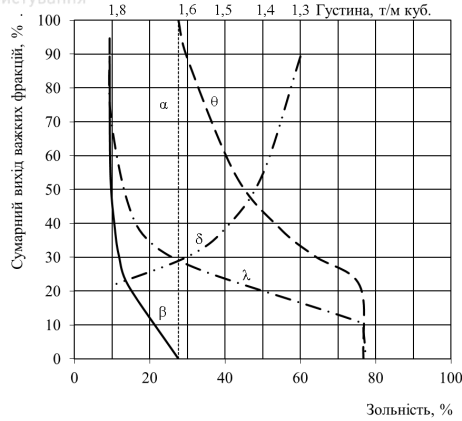


Рис. 4.8. Сумарна фракційна характеристика високозольного фрезерного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк»: α – лінія, що характеризує зольність сировини; β , θ і λ – залежність між виходами легких, важких і елементарних фракцій та зольністю; δ – залежність виходу фракцій від густини розділення

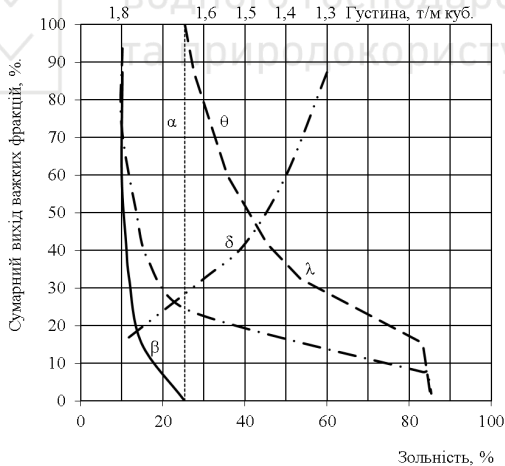


Рис. 4.9. Сумарна фракційна характеристика високозольного фрезерного торфу родовища «Старники»: α – лінія, що характеризує зольність сировини; β , θ і λ – залежність між виходами легких, важких і елементарних фракцій та зольністю; δ – залежність виходу фракцій від густини розділення



Критерій збагачуваності T торфу родовища «Старники» становить 31,10%, що свідчить про, також, дуже важку збагачуваність зразка. Максимальна ефективність розділення по Льюїкену-Хенкоку становить 42,05% при густині розділення більше 1700 кг/м³. При цих значеннях зольність концентрату становить 14,80% з виходом 84,59 % та вилученням горючої маси до концентрату 96,57 %. Вихід концентрату із зольністю 18% становить 90% з вилученням горючої маси до концентрату 98,89%.

В результаті фракційного аналізу визначено, що у високозольних фрезерних торфах родовищ «Засвіття-Ситнелюк» та «Старники» достатнє розкриття мінеральної частини торфу досягається при його подрібненні до класу крупності 0-3 мм. Клас крупності 1-3 мм для більшості зразків має кондиційну зольність, тому його взагалі можна не збагачувати.

Результати досліджень фракційного складу високозольного торфу опубліковані у роботах [49-52].

4.6. Дослідження коефіцієнта тертя частинок високозольного торфу

На ефективність процесу пневматичної сепарації торфу впливає багато факторів, в тому числі й коефіцієнт тертя частинок торфу по стінках та перегородках сепараторів. Числове значення коефіцієнта тертя торфу по поверхні металу залежить від крупності його частинок. Тому в роботі була експериментально досліджена залежність коефіцієнта тертя частинок високозольного торфу по металу залежно від їх крупності.

Дослідження коефіцієнта тертя виконувалося за відомою методикою. На металеву пластину був покладений зразок торфу масою 15-20 грам. Кут нахилу пластини до горизонтальної поверхні збільшувався до такого значення, при якому частинки торфу починають ковзати по пластині і сходити з неї. Коефіцієнт тертя ковзання відповідає тангенсу кута нахилу, при якому зразок торфу сходить з металевієї пластини. Дослідна пластинка була виготовлена зі сталі Ст. 3 та її поверхня була відшліфована. Середня вологість зразків високозольних торфів, що використовуву-



валися в експерименті, становила 18,63-21,09%. Результати експерименту представлені у табл. 4.9 та на рис. 4.10.

Таблиця 4.9

Дослідження коефіцієнта тертя частинок високозольного торфу по сталі

№ з/п	Клас крупності, мм	Середній розмір частинок, мм	Кут нахилу пластини, град	Коефіцієнт тертя ковзання
Високозольний торф родовища «Засвіття-Ситнелюк»				
1	+5	8	26	0,484
2	3-5	4	28	0,529
3	2-3	2,5	26	0,484
4	1-2	1,5	27	0,506
5	0,5-1	0,75	28	0,529
6	0,25-0,5	0,375	30	0,577
1	2	3	4	5
7	0,1-0,25	0,175	38	0,776
8	0-0,1	0,05	48	1,107
Високозольний торф родовища «Старники»				
9	+5	8	27	0,506
10	3-5	4	26	0,484
11	2-3	2,5	27	0,506
12	1-2	1,5	27	0,506
13	0,5-1	0,75	28	0,529
14	0,25-0,5	0,375	31	0,603
15	0,1-0,25	0,175	37	0,744
16	0-0,1	0,05	49	1,162

За результатами експерименту отримані рівняння регресії залежності коефіцієнта тертя ковзання частинок високозольного торфу по сталі залежно від їх відносної крупності d/d_0 , яка одержана на основі теорії розмірностей:

$$f = \frac{1}{32} \cdot \frac{d_0}{d} + 0,5, \quad \text{\%}, \quad (4.12)$$

де d – діаметр частинки, мм; d_0 – діаметр частинки, рівний 1 мм.

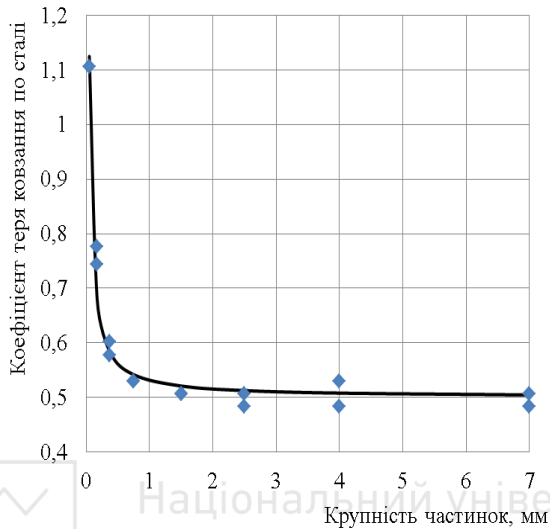


Рис. 4.10. Графік залежності коефіцієнта тертя ковзання по сталі частинок торфу від їх крупності

Максимальна похибка для отриманої залежності не перевищує 14,31%, кореляційне відношення становить 0,98.

Коефіцієнт тертя ковзання по сталі для частинок високосольного торфу починає зростати при їх крупностях менше 0,5 мм. Для частинок високосольного торфу крупністю $-0,1$ мм значення цього коефіцієнта збільшується у 2,2 рази.

4.7. Збагачуваність високосольного торфу пневматичною сепарацією

Методика дослідження збагачуваності високосольного торфу пневматичною сепарацією. Оцінка збагачуваності та побудова технологічних схем збагачення високосольного торфу виконувалися відповідно до рекомендації з літературних джерел [47-48; 53-59]. Для лабораторних досліджень були виготовлені моделі сепаратора типу «Зиг-заг» та каскадно-гравітаційного



сепаратора. Технічні характеристики цих лабораторних моделей наведені у табл. 4.10-4.11.

Дослідження сепараторів типу «Зиг-заг» та каскадно-гравітаційного виконувалися на установці, схематично зображеній на рис. 4.13, яка забезпечує можливість зміни робочої швидкості потоку та відбір продуктів сепарації.

Установка (рис. 4.13) складається з бункера для вихідного продукту 1, засувки для регулювання подачі торфу 2, сепаратора типу «Зиг-заг» або каскадно-гравітаційного 3, бункера для важкої фракції 4, диференційного манометра 5, вимірювальної камери 6, з'єднувальних трубопроводів 7, камери 8, рукавного фільтра 9, змінного дифузора 10 та вентиляторної установки 11.

Досліди проводили таким чином: вихідний продукт засипали в бункер 1, вмикали вентиляторну установку 11 і диференційним манометром 5 фіксували значення динамічного тиску.

Таблиця 4.10

Технічні характеристики лабораторного сепаратора
типу «Зиг-заг»


	Продукт	торф
	Клас крупності	0–5 мм
	Вологість	5–60 %
	Продуктивність	210 кг/год
	Витрата повітря	70 м ³ /год
	Робоча швидкість	0,5–5 м/с
	Габаритні розміри	650x180x100
	Максимальна концентрація торфу	3 кг/кг повітря

Рис. 4.11. Фото лабораторного сепаратора типу «Зиг-заг»



Технічні характеристики лабораторного
каскадно-гравітаційного сепаратора

	Продукт	торф
	Клас крупності	0–5 мм
	Вологість	5–60 %
	Продуктивність	300 кг/год
	Витрата повітря	100 м ³ /год
	Робоча швидкість	0,5–6 м/с
	Габаритні розміри	650x90x100
	Максимальна концентрація торфу	3 кг/кг повітря

Рис. 4.12. Фото лабораторного каскадно-гравітаційного сепаратора

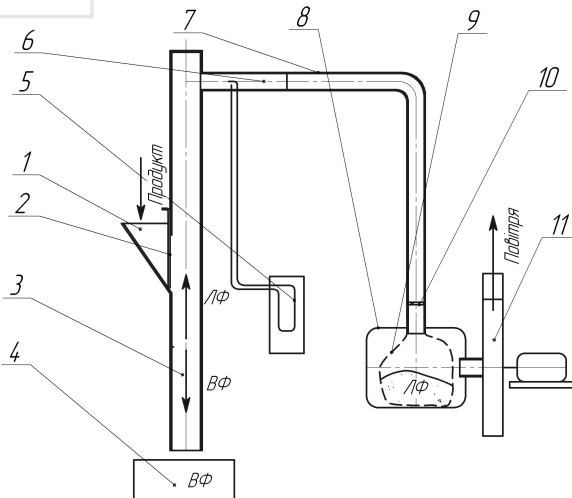


Рис. 4.13. Схема установки для випробувань сепараторів типу «Зиг-заг» та каскадно-гравітаційного



Після цього здійснювали подачу торфу з бункеру 1 у сепаратор 3. Зразки важкої фракції відбиралися з бункера 4, а легкої – з рукавного фільтра 9. Отримані продукти направлялися на визначення вологості та зольності. Досліди виконувалися при різних робочих значеннях вологості продукту та різних робочих швидкостях повітря, які змінювалися за допомогою дифузора 10, виконаного у вигляді кільцевої діафрагми. Швидкість у вимірювальній камері 6 розраховувалася за значенням динамічного тиску, а швидкість у розділювальній камері 3 визначалась із рівняння нерозривності потоку, з урахуванням площ перерізу обох камер. При кожній робочій швидкості дослід повторювався тричі. За остаточні значення масових виходів фракцій та їх зольностей приймалися середні. За результатами дослідів були побудовані криві збагачуваності високозольних торфів.

При оцінці збагачуваності високозольного торфу на пневматичному сепараторі типу «Зиг-заг» розглядалися кілька варіантів його розділення на два потоки в рамках існуючих технологій виготовлення торфових брикетів і пелет (гранул). В умовах виробництва торфових брикетів з використанням сушарки типу «Цемаг» на сушіння подається вологий торф класу крупності 0-5 мм чи 0-8 мм. Після сушіння, за рахунок усадки частинок та часткового подрібнення, переважна більшість частинок має клас крупності 0-3 мм. При виробництві пелет спостерігається аналогічна ситуація, однак після сушіння виконується подрібнення до класу крупності 0-0,5 мм, тому сепарацію можна проводити як до, так і після подрібнення.

При виробництві торфових брикетів за іншою схемою сировина сушиться та подрібнюється одночасно за допомогою пневмо-газової сушарки з шахтним млином. У результаті отримуємо висушений торф, що містить 85-90% класу крупності 0-1 мм. Тому для оцінки збагачуваності використовувався високозольні торфи родовищ «Старники» та «Засвіття-Ситнелюк», подрібнені до класів крупності 0-3 мм, 0-1 мм та 0-0,5 мм.

Результати досліджень збагачуваності високозольного торфу на сепараторі типу «Зиг-заг». Перед дослідженнями зразок високозольного торфу був підсушений до вологості 15-20% та розділений на три продукти, які подрібнювались на від-



повідні класи крупності. Дослідження проводились при робочих швидкостях потоку 1,12-4,35 м/с. Результати дослідів наведені у табл. 4.12. На їх основі побудовані криві збагачуваності, зображені на рис. 4.14-4.17.

Таблиця 4.12

Результати дослідів з пневматичної сепарації високозольних торфів родовищ «Засвіття-Ситнелюк» та «Старники» на сепараторі типу «Зиг-заг»

№ з/п	Назва продукту	Робоча швидкість м/с	Масовий вихід у перерахунку на суху речовину, %	Зольність, %	Вилучення золи, %
1	2	3	4	5	6
Подрібнений високозольний торф родовища «Засвіття-Ситнелюк» класу крупності 0-3 мм					
1	ЛФ 1.1	1,59	7,73	19,39	5,97
2	ЛФ 1.2	2,15	16,35	48,32	31,48
3	ЛФ 1.3	2,90	12,20	41,17	20,01
4	ЛФ 1.4	3,54	10,41	30,14	12,50
5	ЛФ 1.5	4,35	13,87	16,11	8,90
6	ВФ 1.5	4,35	39,44	13,45	21,14
Всього	-	-	100,00	25,10	100,00
Подрібнений високозольний торф родовища «Старники» класу крупності 0-3 мм					
1	ЛФ 1.1	1,59	4,31	21,17	3,50
2	ЛФ 1.2	2,15	18,06	44,89	31,11
3	ЛФ 1.3	2,90	10,64	39,21	16,01
4	ЛФ 1.4	3,54	9,41	31,14	11,24
5	ЛФ 1.5	4,35	11,20	16,64	7,15
6	ВФ 1.5	4,35	46,38	17,41	30,98
	-	-	100,00	26,06	100,00
Подрібнений високозольний торф родовища «Засвіття-Ситнелюк» класу крупності 0-1 мм					
1	ЛФ 2.1	1,30	11,09	18,39	6,71



продовження табл. 4.12

1	2	3	4	5	6
2	ЛФ 2.2	1,59	19,93	21,85	14,33
3	ЛФ 2.3	2,15	26,72	29,77	26,18
4	ЛФ 2.4	2,90	15,53	34,10	17,42
5	ЛФ 2.5	4,35	19,99	38,18	25,11
6	ВФ 2.5	4,35	6,75	46,24	10,26
Всього	-	-	100,00	30,39	100,00
Подрібнений високозольний торф родовища «Засвіття-Ситнелюк» класу крупності 0-0,5 мм					
1	ЛФ 3.1	1,12	18,49	20,61	12,61
2	ЛФ 3.2	1,35	15,75	21,73	11,33
3	ЛФ 3.3	1,59	27,89	25,03	24,27
4	ЛФ 3.4	1,89	16,65	33,33	18,37
5	ЛФ 3.5	3,24	16,03	43,01	22,82
6	ВФ 3.5	3,24	5,19	61,75	10,61
Всього	-	-	100,00	29,86	100,00

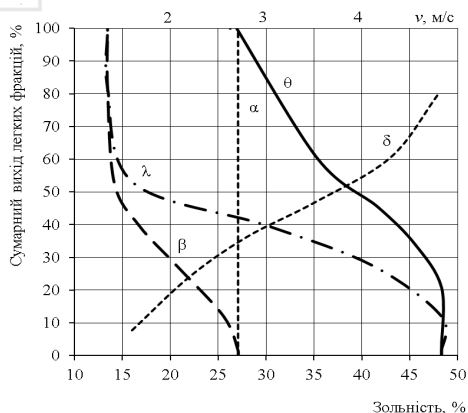


Рис. 4.14. Криві збагачуваності високозольного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк» класу крупності 0-3 мм: α – лінія, що характеризує зольність сировини; β , θ і λ – залежність між виходами ВФ (концентрату), ЛФ (відходів) і елементарних фракцій та зольністю; δ – залежність виходу фракцій від швидкості потоку

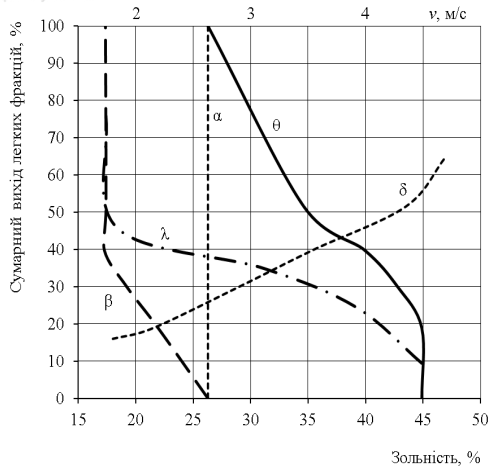


Рис. 4.15. Криві збагачуваності високозольного торфу родовища «Старники» класу крупності 0-3 мм: α – лінія, що характеризує зольність сировини; β , θ і λ – залежність між виходами ВФ (концентрату), ЛФ (відходів) і елементарних фракцій та зольністю; δ – залежність виходу фракцій від швидкості потоку

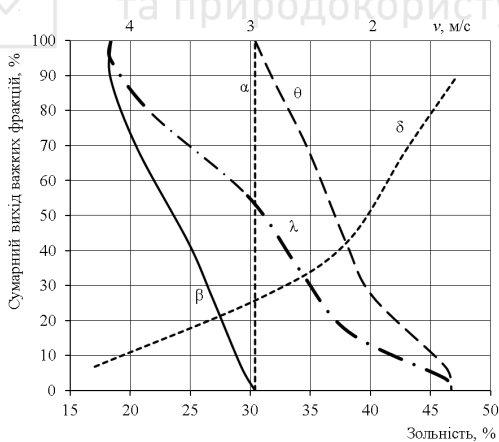


Рис. 4.16. Криві збагачуваності високозольного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк» класу крупності 0-1 мм: α – лінія, що характеризує зольність сировини; β , θ і λ – залежність між виходами ЛФ (концентрату), ВФ (відходів) і елементарних фракцій та зольністю; δ – залежність виходу фракцій від швидкості потоку

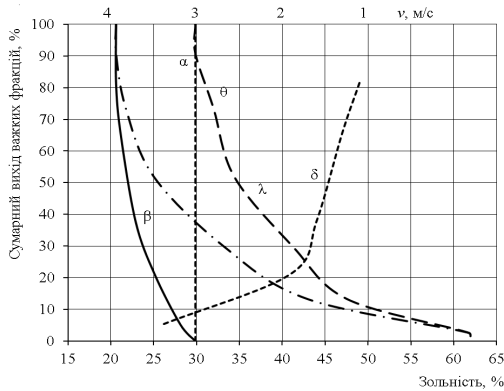


Рис. 4.17. Криві збагачуваності високозольного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк» класу крупності 0-0,5 мм: α – лінія, що характеризує зольність сировини; β , θ і λ – залежність між виходами легких фракцій (концентрату), важких фракцій (відходів) і елементарних фракцій та зольністю; δ – залежність виходу фракцій від швидкості потоку

При пневматичній сепарації класу крупності 0-3 мм частину легкої фракції можна приєднати до концентрату, тому для запобігання спотворення кривих збагачуваності, ЛФ 1.1 не враховувалася при їх побудові.

При сепарації класу крупності 0-3 мм результати суттєво відрізняються, оскільки концентратом у даному випадку є важка фракція, основну масу якої становлять частинки класу крупності 1-3 мм.

Пневматична сепарація класів крупності 0-1 мм та 0-0,5 мм дає значно гірші результати. Концентратами при сепарації цих класів крупності є легкі фракції. Додаткове подрібнення негативно впливає на процес пневматичної сепарації, оскільки частина мінералів золи також подрібнюється і переходить у дрібні фракції, які, у свою чергу, потрапляють у легку фракцію.

Забезпечити необхідні результати по вилученню золи та зольностей важких і легких фракцій можливо тільки при крупності подрібнення частинок $-3+0$ мм, причому легку фракцію,



виділену при швидкості 1,59 м/с, потрібно приєднати до концентрату. Концентратом є важка фракція, виділена при швидкості повітряного потоку 3,5-5,5 м/с.

Пневматична сепарація на сепараторі типу «Зиг-заг» фактично виконує класифікацію, за рахунок якої відбувається зниження зольності. Ця операція придатна для використання при побудові технологічної схеми збагачення високозольного торфу.

Результати досліджень збагачуваності високозольного торфу на каскадно-гравітаційному сепараторі.

Досліди виконувались на дослідній установці рис. 4.13, з використанням лабораторного каскадно-гравітаційного сепаратора (рис. 4.12). Досліджувався високозольний торф вологістю 15-20%, подрібнений до класу крупності 0-3 мм. Швидкість повітряного потоку в робочому об'ємі пневматичного сепаратора змінювалася у межах 1,59-4,44 м/с. Результати дослідів наведені у табл. 4.13, а криві збагачуваності – на рис. 4.18 та 4.19.

Таблиця 4.13

Результати дослідів з пневматичної сепарації високозольного торфу на каскадно-гравітаційному сепараторі

№ з/п	Назва продукту	Робоча швидкість, м/с	Масовий вихід у перерахунку на суху речовину, %	Зольність, %	Вилучення золи, %
1	2	3	4	5	6
Подрібнений високозольний торф родовища «Засвіття-Ситнелюк» класу крупності 0-3 мм					
1	ЛФ 4.1	1,59	9,37	20,14	7,13
2	ЛФ 4.2	2,15	16,96	51,06	32,73
3	ЛФ 4.3	2,90	10,20	42,81	16,50
4	ЛФ 4.4	3,54	11,23	33,16	14,07
5	ЛФ 4.5	4,44	13,65	17,13	8,84
6	ВФ 4.5	4,44	38,59	14,21	20,72
Всього		-	100,00	26,46	100,00



продовження табл. 4.13

1	2	3	4	5	6
Подрібнений високозольний торф родовища «Старники» класу крупності 0-3 мм					
1	ЛФ 4.1	1,59	5,11	20,06	3,82
2	ЛФ 4.2	2,15	18,85	47,34	33,27
3	ЛФ 4.3	2,90	9,40	40,35	14,14
4	ЛФ 4.4	3,54	9,01	32,54	10,93
5	ЛФ 4.5	4,44	12,03	15,94	7,15
6	ВФ 4.5	4,44	45,6	17,28	29,38
Всього		-	100,00	26,82	100,00

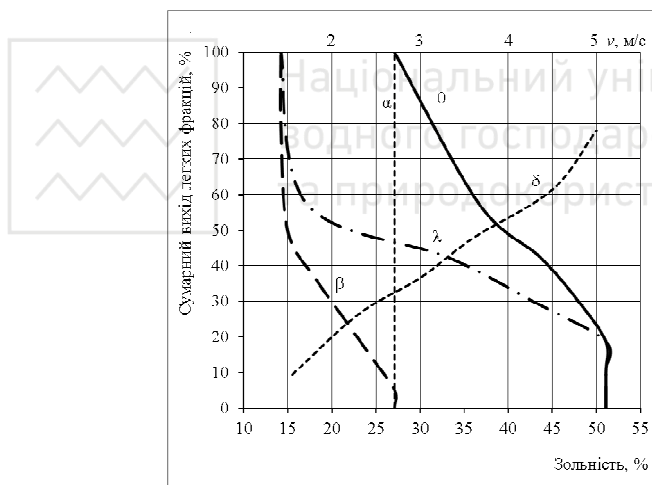


Рис. 4.18. Криві збагачуваності високозольного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк» класу крупності 0-3 мм, отримані на каскадно-гравітаційному сепараторі: α – лінія, що характеризує зольність сировини; β , θ і λ – залежність між виходами ВФ (концентрату), ЛФ (відходів) і елементарних фракцій та зольністю; δ – залежність виходу фракцій від швидкості потоку

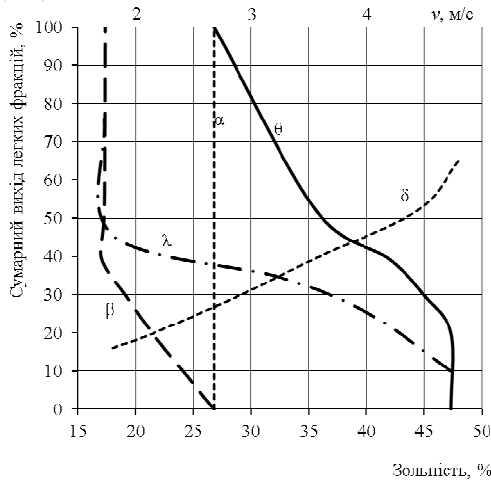


Рис. 4.19. Криві збагачуваності високозольного торфу родовища «Старники» класу крупності 0–3 мм, отримані на каскадно-гравітаційному сепараторі: α – лінія, що характеризує зольність сировини; β , θ і λ – залежність між виходами ВФ (концентрату), ЛФ (відходів) і елементарних фракцій та зольністю; δ – залежність виходу фракцій від швидкості потоку

При побудові кривих збагачуваності легка фракція ЛФ 4.1 не враховувалась. Враховувалось, що криві збагачуваності будуються для знепиленого продукту.

Результати, отримані при пневматичній сепарації високозольного торфу класу крупності 0–3 мм на каскадно-гравітаційному сепараторі, співмірні з результатами, отриманими на сепараторі типу «Зиг-заг».

Отже, пневматичну сепарацію з використанням каскадно-гравітаційного сепаратора також можна використовувати при побудові технологічної схеми збагачення. Результати досліджень збагачуваності високозольного торфу пневматичною сепарацією опубліковані у роботах [60–62].



4.8. Збагачуваність високозольного торфу вібраційною сепарацією

Моделювання роботи вібраційного сепаратора проводилося за допомогою віброживильника з використанням спеціальних накладок та допоміжних пристроїв. Технічні характеристики моделі сепаратора наведені у табл. 4.14.

При дослідженнях збагачуваності високозольного торфу на звужуючому вібраційному лотку використовувався високозольний торф класу крупності 0-3 мм, висушений до вологості менше 20% та знепилений.

Для моделювання роботи сепаратора використовувався віброживильник, на якому закріплювалися звужуючі планки (рис. 4.20) так, що ширина робочої зони біля місця подачі продукту становила 500 мм, а у місці розвантаження – 100 мм. Частота вібрацій становила 50 Гц, амплітуда становила 3 мм. Кут нахилу вібраційного лотка до горизонту регулювався у межах 0–30°. Найширше «віяло» було отримане при куті нахилу вібраційного лотка 30° до горизонту та максимальній амплітуді коливань. Висота падіння продукту з вібраційного лотка становила 100 мм. Бункери для збору важкої та легкої фракцій переміщалися по ширині «віяла» з координатами границі розділення x , відповідно, 0, 1, 2 і 3 см. За паралельними дослідженнями з одним продуктом побудовані криві збагачуваності високозольних торфів родовищ «Старники» та «Засвіття-Ситнелюк», зображені на рис. 4.21 та 4.22.

У результаті збагачення високозольних торфів родовищ «Старники» та «Засвіття-Ситнелюк» на звужуючому вібраційному лотку вдається отримати концентрати зольністю 20% і масовим виходом до 63%. Вилучення горючої маси до концентрату при цьому становить до 42,7%. Концентрату зольністю 20% отримано з масовим виходом 67,4%.

Отже, сепарація на звужуючому вібраційному лотку придатна для використання у процесі збагачення високозольного торфу. Результати досліджень збагачуваності високозольного торфу низинного типу на звужуючому вібраційному лотку опубліковані в роботі [63].



Технічні характеристики лабораторного віброживильника зі
звужуючою накладкою

	Продукт	торф
	Клас крупності	0-5 мм
Вологість	5-55%	
Продуктивність	500 кг/год	
Амплітуда коливань	1-3 мм	
Частота коливань	50 Гц	
Швидкість руху продукту	0,1-0,5 м/с	
Ширина лотка у місці: – завантаження; – розвантаження	500 мм 100 мм	
Кут нахилу лотка до горизонту	0-30°	

Рис. 4.20. Схема звужуючого вібраційного лотка

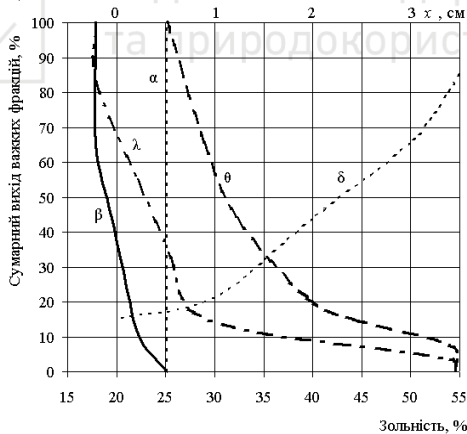


Рис. 4.21. Криві збагачуваності високозольного торфу родовища «Старники», отримані при розділенні на звужуючому вібраційному лотку: α – лінія, що характеризує зольність сировини; β , θ і λ – залежність між виходами легких фракцій (концентрату), важких фракцій (відходів) і елементарних фракцій та зольністю; δ – залежність виходу фракцій від координати межі розділення

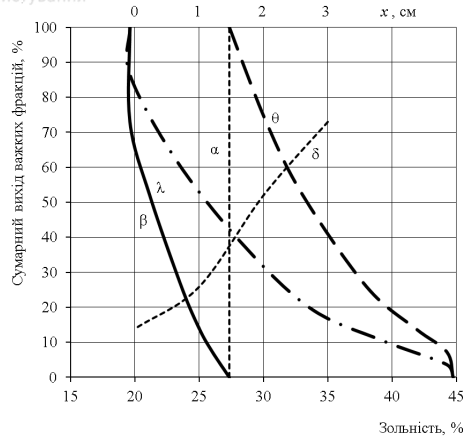


Рис. 4.22. Криві збагачуваності високозольного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк», отримані при розділенні на звужуючому вібраційному лотку: α – лінія, що характеризує зольність сировини; β , θ і λ – залежність між виходами легких фракцій (концентрату), важких фракцій (відходів) і елементарних фракцій та зольністю; δ – залежність виходу фракцій від координати межі розділення

4.9. Дослідження впливу вологості торфу на ефективність його пневматичної сепарації

Торф є дисперсно-пористим колоїдним матеріалом у якому, відповідно до класифікації П.А. Ребіндера, наявна хімічно, фізико-хімічно та механічно зв'язана волога. Вплив вологості високозольного торфу на процес сухої сепарації (пневматичної, вібраційної) проявляється зміною уявної густини частинок та наявністю води на поверхні частинок, що сприяють їх об'єднанню в агрегати.

Уявна густина частинок торфу залежить від його вологості, зольності, ступеня розкладу та розміру частинок. Це детальніше розглянуто у п. 3.4. Відповідно до аналізу залежностей, при зміні вологості від 0 до 50% уявна густина органічної частини торфу може зрости на 14,3%. Така зміна уявної густини частинок торфу не суттєво вплине на ефективність сепарації частинок.



Отже, основний вплив на ефективність сухої сепарації торфу чинить поверхнева волога частинок торфу. Причому негативний вплив вологості на суху сепарацію більш суттєвий у дрібних класах крупності, що пов'язано з їх великою питомою поверхнею [64; 65].

Поверхнева волога на частинках торфу з'являється при досягненні значення критичної вологості w_0 , при якій у торфі наявна хімічно, фізико-хімічно зв'язана і частина механічно зв'язаної вологи. За дослідженнями, що виконувались методом диференційної скануючої калориметрії [66], виявлено, що при вологості торфу 27,5% у ньому залишається лише хімічно та фізико-хімічно зв'язана волога. Вміст хімічно та фізико-хімічно зв'язаної вологи у торфах низинного типу становить 28-35% [24]. Отже, при вологості нижче цього значення її вплив на ефективність сепарації повинен бути відсутній. Також не впливає на процес сухої сепарації частина малорухомої капілярної вологи, розміщеної у внутрішніх порах частинок торфу.

Припускаємо, що критична вологість торфу пропорційна вмісту хімічно та фізико-хімічно зв'язаної вологи

$$w_0 = kw_{x\phi x}, \%, \quad (4.13)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від якісних характеристик торфу, ч.од.; $w_{x\phi x}$ – вміст хімічно та фізико-хімічно зв'язаної вологи, %.

У частинках торфу наявна система внутрішніх капілярів, які сприяють рівномірному розподілу зв'язаної вологи в органічній частині. Мінеральні частинки торфу не здатні поглинати вологу. Тому критична вологість високозольного торфу знижується відповідно до вмісту мінеральної частини. Отже, значення критичної вологості високозольного торфу w_{0B} можна розрахувати за формулою:

$$w_{0B} = \frac{w_0(100 - A)}{100}, \%, \quad (4.14)$$

де A – зольність торфу, %.

При вологості високозольного торфу понад критичну, частинки утворюють агрегати, які можуть руйнуватися при дії зовнішніх сил (наприклад, від удару по стінці сепаратора при пнев-



матичній сепарації, падіння з висоти подачі продукту на сепаратор та ін.). Утворені агрегати руйнуються, якщо зовнішня сила перевищує силу зв'язку цих агрегатів.

Сила зв'язку $F_{зв}$ у перерізі S агрегату, утвореного з частинок вологого матеріалу, відповідно до капілярно-контактної моделі Н.В. Верхотурова [65], визначається за формулою:

$$F_{зв} = \frac{6S\lambda\sigma}{d} \sqrt[3]{\frac{10^{-3}\rho}{m} \cdot \frac{w}{1-w}} \cdot \gamma_m, \text{ Н}, \quad (4.15)$$

де S – площа перерізу частинки, м^2 ; λ – коефіцієнт упаковки частинок у агрегаті, ч.од., σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, Н/м ; d – розмір частинки, м ; ρ – густина частинки, кг/м^3 ; m – кількість контактів, що відносяться до однієї частинки; w – вологість матеріалу, ч.од.; γ_m – частка вологи, яка бере участь у контактних взаємодіях, ч.од.

З урахуванням формули (4.14) частка вологи, яка бере участь у контактних взаємодіях γ_m для високозольного торфу, визначається за формулою:

$$\gamma_m = 1 - \frac{w_0(100 - A)}{100w}, \text{ ч.од.} \quad (4.16)$$

Припустимо, сила удару агрегату, утвореного з частинок вологого матеріалу (високозольного торфу) $F_{y\partial}$ при пневматичній сепарації пропорційна квадрату швидкості. Тоді силу удару знайдемо за формулою:

$$F_{y\partial} = \frac{\rho_n(k_n v)^2 S}{2}, \text{ Н}, \quad (4.17)$$

де ρ_n – густина повітря, кг/м^3 ; k_n – коефіцієнт пропорційності; v – швидкість потоку повітря, м/с ; S – площа перерізу частинки, м^2 .

Прирівнявши формули (4.15) і (4.17) та врахувавши (4.13) і (4.16), знайдемо критичну вологість торфу у динамічному режимі (при пневматичній сепарації).



$$w_{0ВП} = \frac{10^{-3} \rho k w_{x\phi x} (100 - A)}{100m} \cdot \left(\frac{12\sigma\lambda}{\rho_n (k_n v)^2 d} \right)^3 + 1, \text{ ч.од.} \quad (4.18)$$

$$\frac{10^{-3} \rho}{m} \cdot \left(\frac{12\sigma\lambda}{\rho_n (k_n v)^2 d} \right)^3 + 1$$

У отриманій формулі коефіцієнт пропорційності k_n потрібно уточнити експериментально.

Застосувавши теорію розмірностей, знаходимо критерій впливу вологості на ефективність сепарації:

$$k_e = \frac{F_{зв}}{F_{y\partial}} = \frac{12\lambda\sigma}{\rho_n (k_n v)^2 d} \sqrt[3]{\frac{10^{-3} \rho}{m} \cdot \frac{w}{1-w} \cdot \left(1 - \frac{w_0(100-A)}{100w} \right)}, \text{ ч.од.} \quad (4.19)$$

За результатами експериментальних досліджень, вплив вологості на ефективність пневматичної сепарації оцінювався крутизною сепараційної характеристики, яку характеризує середнє імовірнісне відхилення від крупності розділення.

Дослідження впливу вологості на процес сухої сепарації проводилося на прикладі пневматичної сепарації у сепараторі типу «Зиг-заг». Масова концентрація торфу в повітряному потоці у всіх дослідах становила 1,5-2,0 кг/кг. У класі крупності 0-3 мм пневматична сепарація дуже близька до розділення за крупністю, тому за роздільну ознаку приймалася крупність частинок d . Для побудови залежності розділових чисел від крупності розділення $E=f(d)$ їх значення визначалося за відомою формулою:

$$E = \gamma_l \frac{\gamma_{il}}{\gamma_{is}}, \quad (4.20)$$

де γ_l – масовий вихід легкої фракції, ч. од.; γ_{il} – вміст i -го класу крупності у легкій фракції після сепарації, %; γ_{is} – вміст i -го класу крупності у вихідному продукті, %. Вміст i -го класу крупності у вихідному продукті знайдемо з рівняння балансу продуктів



збагачення, знаючи вміст i -го класу крупності у важкій фракції та масові виходи важкої і легкої фракцій, відповідно.

Середнє імовірнісне відхилення визначалося за відомою формулою:

$$E_{pm} = \frac{d_{25} - d_{75}}{2}, \quad (4.21)$$

де d_{25} та d_{75} – крупності, при яких розділове число рівне 0,25 та 0,75 ч. од.

Зі збільшенням вологості та крупності розділення значення E_{pm} буде збільшуватися. Цю зміну запропоновано враховувати коефіцієнтом впливу вологості k_w :

$$E_{pmw} = \frac{E_{pm0}}{k_w}, \quad (4.22)$$

де E_{pmw} – значення середнього імовірнісного відхилення при вологості w , ч.од; E_{pm0} – значення середнього імовірнісного відхилення при вологості, меншій за критичну. Коефіцієнт впливу вологості k_w було представлено як функцію від критерію впливу вологості на ефективність сепарації k_e .

Для досліджень використовувались зразки торфу вологістю від 5,43 до 48,95% та робочі швидкості повітряного потоку у межах від 3,76 до 6,26 м/с. Результати дослідів зображені у вигляді сепараційних характеристик на рис. 4.23.

За отриманими експериментальними даними побудовано графік залежності середнього імовірнісного відхилення від крупності розділення (для різних середніх значень крупності розділення) від вологості торфу (рис. 4.24).

Враховавши значення критичних вологостей та інші параметри сепарації визначено, що значення коефіцієнта пропорційності, який характеризує параметри удару частинок торфу k_n формули (4.18) становить 1,82.

Для кожного дослідного режиму пневматичної сепарації розрахований критерій впливу вологості на ефективність сепарації k_e . Залежність коефіцієнту впливу вологості k_w та критерію k_e зображено на графіку (рис. 4.25).

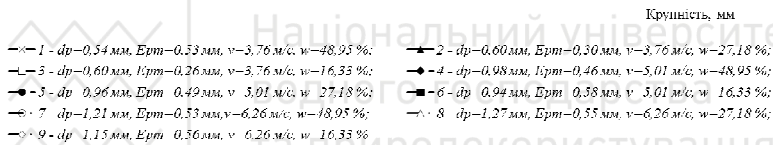
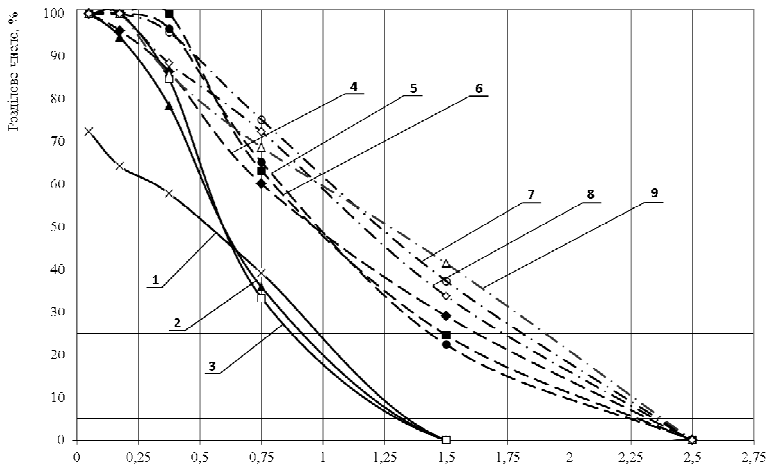
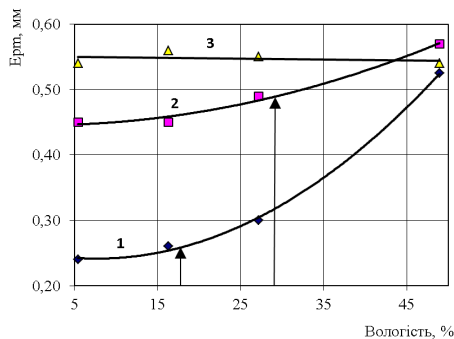


Рис. 4.23. Сепараційні характеристики сепаратора типу «Зиг-заг» (залежності розділових чисел від крупності розділення $E=f(d)$: v – робоча швидкість повітряного потоку; w – вологість, %



◆ 1 - d_p . $cr.$ = 0,59 мм; ■ 2 - d_p . $cr.$ = 0,94 мм; ▲ 3 - d_p . $cr.$ = 1,21 мм

Рис. 4.24. Графік залежності середнього імовірного відхилення E_{pt} від вологості торфу (значення критичних вологостей w_{0VP} розраховані за формулою (4.18) для режимів сепарації з різними крупностями розділення зображені стрілкою)

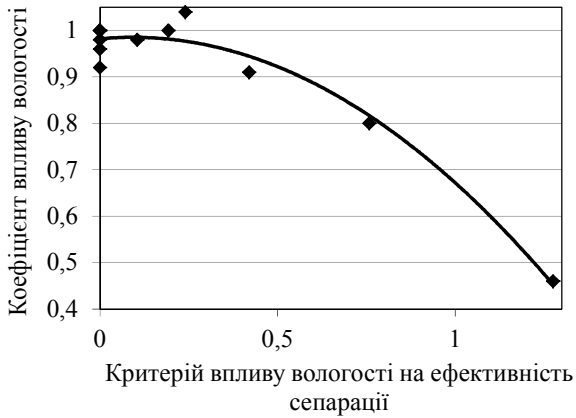


Рис. 4.25. Графік залежності коефіцієнта впливу вологості від критерію впливу вологості на ефективність сепарації

Для цієї залежності отримано рівняння регресії:

$$k_w = 1 - 0,35k_e^2 \quad (4.23)$$

Коефіцієнт детермінації для отриманого рівняння регресії становить 0,954, а максимальна відносна похибка – 8,7%.

Для спрощеного розрахунку значень цього коефіцієнту впливу вологості отримано рівняння регресії:

$$k_w = 1,2 - 2,3 \cdot \frac{w}{100} - 0,18d + 1,9 \cdot \frac{wd}{100}, \text{ ч.од.}, \quad (4.24)$$

де w – вологість високозольного торфу, %; d – крупність розділення, мм.

Коефіцієнт детермінації для отриманого рівняння регресії становить 0,92, а максимальна відносна похибка – 11,49%.

Графік залежності коефіцієнта впливу вологості для різних середніх значень крупності розділення від вологості торфу зображено на рис. 4.26.

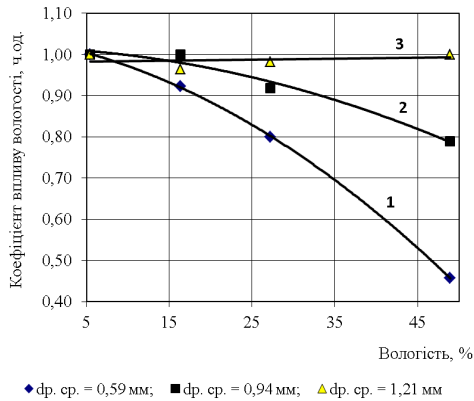


Рис. 4.26. Графік залежності коефіцієнта впливу вологості від вологості торфу

Отже, вплив вологості високозольного торфу на ефективність пневматичної сепарації знижується при досягненні його критичної вологості, значення якої враховує параметри частинок та швидкість їх руху. Спостерігається хороша збіжність між розрахунковими значеннями критичної вологості та результатами експерименту [67].



5. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПНЕВМАТИЧНОЇ СЕПАРАЦІЇ ТОРФУ

5.1. Аналіз відомих методів та обладнання для сепарації торфу

Умовно виділимо дві групи методів і обладнання для сухого збагачення торфу: методи та обладнання, що використовують для сухої сепарації торфу; методи та обладнання, що потенційно можуть використовуватись для сепарації торфу.

5.1.1. Методи та обладнання, що використовують для сухої сепарації торфу

Відомі методи сухої пневматичної та вібраційної сепарації торфу. Найбільш поширені на практиці методи пневматичної сепарації у вертикальних, відцентрових та горизонтальних газових потоках [28; 68-78]. Вказані методи сепарації реалізуються у пневмосепараційних шахтах, циклонах, пристроях для фракціонування у горизонтальному повітряному потоці та вібруючих решетах.

Пневмосепараційні шахти є елементом пневмогазових сушарок торфобрикетних заводів з розміщеним у нижній їх частині шахтним млином, ротор якого працює аналогічно молотковій дробарці [66; 68; 72; 77; 78]. Пневмосепараційні шахти використовують для пневматичної сепарації частинок торфу при сушінні та, згідно розрахунків, можуть використовуватися для виділення крупних частинок золи. Однак в існуючих конструкціях шахтномлиних сушарок виділення вилученої золи з шахти не передбачене.

Циклони системи пилогазоочищення систем ВТІ та НДІ-ОГаз широко використовують на практиці, і вони також є елементами сушильного агрегату [66; 68; 72; 77]. Циклони призначені для вилучення частинок торфу з потоку газу, що використовується як сушильний агент.

Дослідження сепарації торфу у вертикальному повітряному потоці проводили А.М. Зальцман та Ф.С. Яцевич. Установки цих дослідників мають практично однакову конструкцію, хоча вони працювали над різними задачами. А.М. Зальцман у такий



спосіб отримував однорідні за крупністю фракції подрібненого торфу [70; 71], а Ф.С. Яцевич займався безпосередньо збагаченням (зниженням зольності) торфу [28]. Результати, наведені в [28], не демонструють значної ефективності, але показують принципову можливість збагачення фрезерного та подрібненого кускового торфу методом пневматичної сепарації. Вилучення горючої маси у концентрат становило до 89,8% із незначними зниженням зольності (на 0,3-3,5%). В досліджах використовувалися зразки переважно нормальнозольного торфу, тому поведінку високозольного за таких умов потрібно додатково перевіряти.

Відома розробка Московського філіалу ВНДІПІ пневмосепараційної сушарки [68; 72; 78], пневматичним сепаратором якої торф розділяють на два потоки: важку та легку фракцію. Важку фракцію з високою вологістю і більш засмічену зольними включеннями спрямовують на спалювання до теплогенератора торфобрикетного заводу, а легку – на брикетування. Пневматичний сепаратор цієї сушарки складається з циліндричного корпусу, в нижню частину якого вертикально подається висхідний потік зважених частинок торфу, що прямує до пелюсткового імпактора. Після ударів частинок торфу по пелюстках імпактора більш важкі частинки втрачають швидкість та осаджуються у нижній частині камери сепаратора. Осаджений продукт направляють на спалювання до теплогенератора. Легка фракція в потоці газу виводиться з сепаратора у верхній частині, та направляється на брикетування. У спрощеному вигляді (без регулювання положення імпактора) пневмосепараційна сушарка впроваджена лише на торфобрикетному заводі «Глінка» (Республіка Білорусь), тому вичерпних висновків щодо ефективності її роботи зі збагачення торфу зробити поки не можна.

Відомі патенти на способи та пристрої для сепарації торфу [73-76].

Один з них – це «Спосіб фракціонування торфу та пристрій для його фракціонування» [73], за яким автор пропонує проводити сепарацію подрібненого торфу у горизонтальному повітряному потоці з подачею у нижню частину пневмосепараційної камери. У пневмосепараційній камері сепаратора розта-



шовані вертикальні перегородки, висота яких збільшується у напрямку руху продукту.

За патентом США [74] пропонується спосіб та обладнання для виділення сфагнового моху з торфу. Для України така задача не є актуальною, оскільки верхових торфів, які можуть містити сфагновий мох, лише 1,8% від усіх запасів торфу в країні.

Авторами [75] пропонується пристрій для сепарації торфу на вібруючому решеті, під яке подається повітряний потік, що видуває з шару торфу у киплячому стані дрібні частинки. Вилучені повітряним потоком частинки направляються у підрешітний продукт з потоком повітря через проміжки між корпусом пристрою та решета.

Усі запропоновані пристрої для сепарації торфу не призначені для його знезолнення. Лише один з наведених пристроїв використовувався безпосередньо для збагачення торфу, але ефективність його виявилась невисокою.

5.1.2. Методи та обладнання, що потенційно придатні для сепарації торфу

Відомі методи, що потенційно придатні для сухої сепарації, можна розділити на пневматичні, вібраційні та вібраційно-пневматичні. Вказані методи сепарації використовуються у різноманітних пристроях гравітаційного збагачення [32; 35; 64; 79-100].

Пневматичні відсаджувальні машини [35; 79-84] призначені для збагачення вугілля дрібних класів. Продукт розділяється у висхідному псевдозрідженому пульсуючому повітряному потоці. Пневматичні відсаджувальні машини використовують для збагачення вугілля легкої та середньої збагачуваності та бурого вугілля, яке за властивостями подібне до торфу. Проте дрібні класи крупності (0-1 мм) при сепарації у цих машинах переходять у концентрат без збагачення [101]. Крім того, відсаджувальні машини працюють при великих масових концентраціях продукту, що також негативно впливає на ефективність сепарації продуктів, здатних до злипання. Тому ці пристрої не можна використати для збагачення торфу, оскільки саме у класі крупності 0-1 мм знаходиться основна частка золи.



Широко розповсюджені відцентрові пневматичні класифікатори (сепаратори) [35; 79; 85-88] у яких крупність розділення становить від 0,005 до 1,5 мм. Проте ці пристрої придатні лише для добре висушеного торфу. Вони не можуть забезпечити ефективну дезінтеграцію матеріалу, оскільки частинки ударяються об стінки з великою дотичною, а не нормальною швидкістю.

Для сепарації дрібних продуктів використовуються пневматичні каскадно-гравітаційні класифікатори з пересипними полицями та каскадні класифікатори типу „Зиг-заг” [32; 35; 88-92]. Їх застосовують переважно для знепилення продуктів збагачення. Принцип дії цих апаратів наступний. Продукт, що підлягає класифікації, спрямовують на класифікацію та завантажують у середній частині класифікатора. Під дією сили тяжіння він падає на полиці, розміщені по чергові на правій та лівій стороні продуктопроводу під кутом до горизонту. У нижню частину класифікатора подають висхідний повітряний потік, який продуває потік продукту у місцях пересипання, вилучаючи дрібніші частинки. Утворена пило-повітряна суміш виводиться з пневмо-класифікатора у верхній частині, а відкласифікований продукт – у нижній. Ці класифікатори мають просту конструкцію і так само прості в експлуатації. У сепараторі типу «Зиг-заг» можна отримати великі значення нормальної складової швидкості удару частинок по стінках та перегородках сепаратора. Через це їх доцільно застосовувати для сухої сепарації подрібненого торфу.

Серед останніх розробок із пневматичної сепарації відомі способи пневмовібраційної, вакуумно-пневматичної, пневматичної сепарації у горизонтальному потоці та гвинтової пневматичної сепарації [93-97].

Принцип дії комплексу вакуумно-пневматичної сепарації наступний. Продукт класифікують на вузькі класи крупності, після чого конвеєром із сітчастою стрічкою подають у камери, в яких формуються вертикальні повітряні потоки. Легкі частинки, за допомогою вихрового потоку, закидаються у збірник легкої фракції, розміщений у верхній частині камери, а важкі падають знову на стрічку конвеєра. Після цього продукт рухається до наступної камери з більшою швидкістю повітряного потоку, де процес повторюється [95]. Але цей комплекс не придатний для



сепарації торфу, оскільки ефективно працює на крупних класах продуктів.

У роботах [94; 97] пропонується виконувати пневматичну сепарацію дрібних класів вугілля у горизонтальному повітряному потоці. Цей процес ускладнюється необхідністю підготовки дрібних і вузьких машинних класів крупності.

Пневматичний гвинтовий сепаратор за будовою аналогічний гвинтовому сепаратору. Його використовують для збагачення руд з великою густиною з додаванням у потік кварцового піску, частинки якого «бомбардують» частинки руд з великою густиною (золото, ільменіт та інші) [96].

Вібраційні та пневмовібраційні сепаратори [32; 64; 98-99] виконують розділення продуктів за тертям та пружністю. Відомі кілька видів цих пристроїв. Серед них сепаратори з плоскими, увігнутими та конічними деками. Вібраційні сепаратори з плоскими та увігнутими деками складаються з деки, встановленої під кутом до горизонту у двох площинах і розташованої на вібраційних опорах, та джерела вібрації. Вібрації спрямовані у напрямку найвищого краю деки, так що частинки з великими коефіцієнтами тертя піднімаються вгору. Нахил деки у двох площинах забезпечує розвантаження продукту із трьох її сторін [64; 98-99]. Вібраційні сепаратори забезпечують якісне розділення продуктів, та основними недоліками є мала продуктивність та велика кількість контактів частинок продукту між собою, що створює загрозу їх злипання.

Для сепарації подрібненої деревини, яка подібна за властивостями до подрібненого торфу, використовують пневматичні сепаратори з вертикальним газовим потоком. Для виділення мінеральних часток у деревообробній промисловості використовують вібраційні сита, але ефективність їх роботи не перевищує 50% [100].

Отже, для ефективного збагачення високозольного торфу за рахунок виділення високозольного класу крупності 0-1 мм, доцільно використовувати розділення у каскадно-гравітаційному сепараторі чи сепараторі типу «Зиг-заг». Більш перспективним є використання сепаратора типу «Зиг-заг», оскі-



льки така сепарація може забезпечити ефективну дезінтеграцію частинок що злиплися.

5.2. Аналіз методів розрахунку сепараційних характеристик пневматичної сепарації у висхідних криволінійних потоках

Розробкою та вдосконаленням теоретичних основ процесів сепарації, зокрема й пневматичної сепарації у висхідних криволінійних потоках, на базі яких побудовані методи розрахунку сепараційних характеристик, займалися вчені: Барський М.Д., Білецький В.С., Кірсанов В.А., Мізонов В.Є., Назимко О.І., Олійник Т.А., Пілов П.І., Тихонов О.М. та представники їх наукових шкіл [53; 54; 89; 93; 102-107].

Виділимо чотири групи методів, які використовують для розрахунку сепараційних характеристик пневматичних сепараторів у висхідному криволінійному потоці, а саме:

- за рівняннями сепарації;
- за траєкторіями руху частинок;
- за допомогою ланцюгів Маркова;
- за критерієм Фруда.

Проаналізуємо можливості врахування нерівномірності поля швидкості у вказаних методах розрахунку сепараційних характеристик.

Отримання сепараційних характеристик шляхом розв'язання рівнянь сепарації, які включають рівняння закону збереження маси та балансу сил, що діють на частинки, розглянуто у роботах Мізонова В.Є., Пілова П.І., Тихонова О.М. [53; 54; 102].

При розв'язку рівнянь сепарації отримують рівняння типу Колмогорова – Фоккера – Планка. Коефіцієнти переміщення та макродифузії частинок у цьому рівнянні приймаються сталими величинами, тому вплив нерівномірності поля швидкості у робочому об'ємі сепаратора переважно не враховують, хоча метод це дозволяє.

У роботах [93; 103-105] вилучення частинок з заданими параметрами визначалося за траєкторіями їх руху. Траєкторії



руху частинок отримували шляхом інтегрування рівняння балансу сил переважно числовими методами. Проте швидкість потоку приймається рівномірно розподіленою або за експериментальними значеннями. Врахування нерівності поля швидкості у робочому об'ємі сепаратора лише за експериментальними значеннями знижує точність розрахунків.

У роботах [106-107] для розрахунку сепараційних характеристик запропоновано використовувати ланцюги Маркова. Суть методу полягає у розбитті робочого об'єму сепаратора на елементарні комірки, у яких процес розділення частинок повторюється. Нерівномірність поля швидкості у цьому методі не враховують.

У роботах Барського М.Д. [89] для розрахунку сепараційних характеристик запропоновано використовувати критерій Фруда. Цей метод ефективний для порівняння різних конструкцій пневматичних сепараторів, але він не враховує нерівномірності поля швидкості у робочому об'ємі сепаратора

Отже, відомі методи розрахунку сепараційних характеристик не дозволяють врахувати вплив нерівномірності поля швидкостей, а його врахування за відомими методиками суттєво ускладнює розрахунки. Оскільки частинки торфу мало інертні, то вплив нерівномірності поля швидкості у робочому об'ємі сепаратора з висхідним криволінійним потоком на параметри сепараційних характеристик є суттєвим, і дослідження цього впливу є актуальним завданням.

5.3. Шляхи вдосконалення конструкції сепаратора типу «Зиг-заг» та методи її аналізу

Основними напрямками вдосконалення конструкції пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг» для забезпечення ефективної сепарації торфу є:

- зменшення нерівномірності горизонтальної складової поля швидкості у робочому об'ємі пневматичного сепаратора;
- покращення дезінтеграції агрегатів частинок торфу, які утворилися внаслідок їх злипання.



В останніх розробках основним напрямком удосконалення пневматичних сепараторів із вертикальним потоком є зменшення нерівномірності поля швидкості шляхом встановлення перфорованих та сітчастих перегородок [108-109]. Але для пневматичної сепарації торфу встановлення вказаних перегородок у повітряному потоці небажане, оскільки при ударі по сітках чи перфорованих решітках частинки торфу частково руйнуються та забивають отвори, через що експлуатація таких сепараторів буде ускладнена.

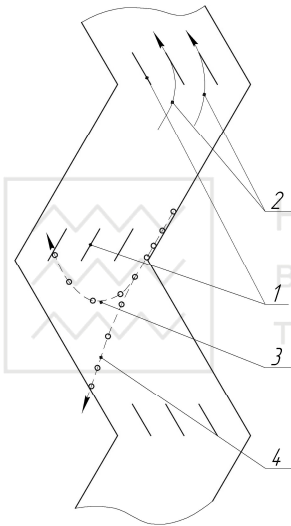


Рис. 5.1. Схема встановлення жалюзійних екранів та руху частинок у пневматичному сепараторі типу «Зиг-заг»: 1 – жалюзійні екрани; 2 – лінія току; 3 – траєкторія руху частинки вгору; 4 – траєкторія руху частинки вниз

З урахуванням цих обставин, авторами була запропонована вдосконалена конструкція пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг» із жалюзійним екраном, що складається з набору пластин, встановлених по дотичній до ліній току, або під гострим кутом до цієї дотичної. Схему встановлення жалюзійних екранів та руху частинок у пневматичному сепараторі типу «Зиг-заг» зображено на рис. 5.1.

Жалюзійні екрани встановлюють на кожному повороті потоку пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг». Ширина пластин жалюзійного екрану повинна бути мінімальною, але достатньою для забезпечення ударів усіх частинок, що проходять крізь екран.

Встановлення жалюзійного екрану дозволяє зменшити нерівномірність поля швидкості. Регулювання цього параметра здійснюється шляхом зміни кроку пластин жалюзійного екрану.

Ефективність дезінтеграції агрегатів частинок торфу визначає сила їх ударів по стінках та перегородках сепаратора. Основну роль у руйнуванні агрегатів відіграє нормальна складо-



ва сили удару. Сила удару частинки по поверхні пропорційна квадрату швидкості. Тому, для максимального використання швидкості руху частинок чи агрегатів для їх дезінтеграції, потрібно досягти максимального значення нормальної складової швидкості удару. Оскільки швидкість удару частинок однакової крупності та густини є сталою величиною, то значення нормальної складової швидкості удару характеризується середнім значенням синуса кута між вектором швидкості і поверхнею удару $\sin \alpha_c$:

$$\sin \alpha_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{v_{ni}}{v_i}, \quad (5.1)$$

де N – кількість ударів, шт.; v_i – швидкість удару, м/с; v_{ni} – нормальна складова швидкості удару, м/с.

Вказаний параметр дозволяє порівнювати конструкції пневматичних сепараторів з позиції ефективності дезінтеграції агрегатів вологих частинок. Найпростіше визначити значення синуса кута між вектором швидкості і поверхнею удару шляхом моделювання.

За попереднім аналізом траєкторій руху частинок 3 та 4 що рухаються вгору та вниз (рис. 5.1) відповідно, у пневматичному сепараторі типу «Зиг-заг» із жалюзійним екраном нормальна складова швидкості удару буде максимальною при запропонованій орієнтації пластин жалюзійного екрану.

Для обґрунтування параметра нерівномірності поля швидкості розглянемо профілі швидкості у горизонтальному перерізі пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг» із жалюзійним екраном (рис. 5.2).

Основними статистичними характеристиками розсіяної величини є її середнє значення, середньоквадратичне відхилення та коефіцієнт варіації. Перша характеризує значення величини, наступні є характеристиками розсіювання. Використаємо ці характеристики як параметри нерівномірності поля швидкості.

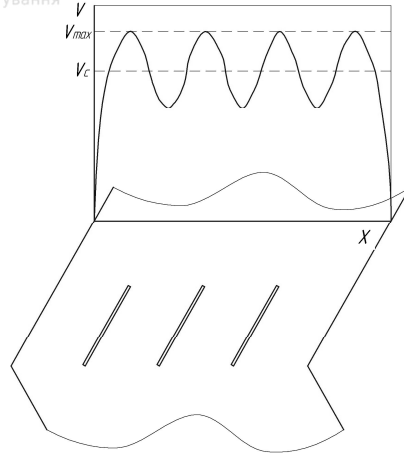


Рис. 5.2. Профілі швидкості у горизонтальному перерізі пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг» із жалюзійним екраном

Камеру пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг» із жалюзійним екраном розділимо сіткою з елементарних паралелепіпедів, у вузлах якої визначимо значення швидкості v_i . Знаючи швидкість у певній множині точок сепаратора, середнє значення швидкості, її середньоквадратичне відхилення та коефіцієнт варіації визначимо за відомими статистичними формулами.

Для спрощення розрахунків поле швидкості доцільно розглядати лише у центральній вертикальній площині сепаратора.

Визначимо вплив параметрів нерівномірності поля швидкості на параметри сепараційної характеристики (крупність розділення та середнє імовірнісне відхилення).

Крупність розділення відповідає параметрам рівноважної частки при відповідному середньому значенні швидкості і визначається за відомою формулою Г.К. Смишляєва (у перехідному режимі обтікання частинки):

$$d_p = \frac{v_c}{40,6 \cdot \sqrt[3]{\rho_u^2}}, \text{ м}, \quad (5.2)$$

де v_c – середня швидкість потоку повітря у робочому об'ємі сепаратора, м/с; ρ_u – уявна густина частинок, кг/м³.



Використовуючи формулу (5.2), для розрахунку середнього імовірнісного відхилення визначимо значення d_{25} та d_{75} . Припустимо, що нахил кривої розділення є наслідком нерівномірності поля швидкості. Тоді значення d_{25} та d_{75} визначається з виразів

$$d_{25} = \frac{a_1 v_c (1+V)}{40,6 \cdot \sqrt[3]{\rho_u^2}}, \text{ м}, \quad d_{75} = \frac{a_2 v_c (1-V)}{40,6 \cdot \sqrt[3]{\rho_u^2}}, \text{ м}, \quad (5.3), (5.4)$$

де a_1 , та a_2 – коефіцієнти пропорційності, що враховує інертність частинок та зміщення у горизонтальній площині; V – коефіцієнт варіації швидкості у робочому об'ємі сепаратора, ч.од.

Середнє імовірнісне відхилення від крупності розділення з урахуванням формул (5.3), (5.4) визначаємо наступним чином:

$$E_{pm} = \frac{av_c V}{40,6 \cdot \sqrt[3]{\rho_u^2}} = \frac{as}{40,6 \cdot \sqrt[3]{\rho_u^2}}, \text{ м}, \quad (5.5),$$

де a та b – коефіцієнти пропорційності; s – середньоквадратичне відхилення швидкості, м/с.

Розділивши крупність розділення на середнє імовірнісне відхилення від крупності розділення, отримаємо:

$$\frac{E_{pm}}{d_p} = aV. \quad (5.6)$$

Цей критерій дозволяє отримати залежності між параметрами сепараційних характеристик та виключити вплив густини частинок.

Отже, основним параметром, який характеризує вплив нерівномірності поля швидкості (вертикальної складової) на ефективність пневматичної сепарації, є середньоквадратичне відхилення. В якості критерію нерівномірності поля швидкості доцільно використовувати і коефіцієнт варіації швидкості.

Експериментально визначити розподіл швидкості у робочому об'ємі сепаратора з достатньою точністю складно, тому для цього використано комп'ютерне моделювання потоків та числовий експеримент у спеціалізованому програмному забезпеченні FlowVision 2.5 та КОМПАС 3D – V13 [110-112].



У наступному пункті висвітлено методику і результати дослідження залежностей між параметрами нерівномірності поля швидкості пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг» з жалюзійними екранами, його конструктивними параметрами, параметрами сепараційних характеристик та ударів частинок по стінках і перегородках сепаратора.

5.4. Моделювання процесу пневматичної сепарації торфу в криволінійному потоці

Основними задачами моделювання процесу пневматичної сепарації торфу у криволінійному потоці сепаратора типу «Зиг-заг» з жалюзійними екранами є:

- отримання залежностей конструктивних параметрів пневматичного сепаратора від параметрів нерівномірності поля швидкості у робочому об'ємі сепаратора;
- дослідження впливу нерівномірності поля швидкості потоку у робочому об'ємі сепаратора на параметри сепараційних характеристик;
- обґрунтування раціональної конструкції жалюзійного екрану сепаратора, виходячи з максимальної рівномірності поля вертикальної складової швидкості потоку та мінімального аеродинамічного опору секції пневматичного сепаратора.

5.4.1. Алгоритм моделювання пневматичної сепарації торфу у криволінійному потоці сепаратора «Зиг-заг»

Методика розрахунку процесу пневматичної сепарації у криволінійному зигзагоподібному потоці складається з наступних етапів:

1. Розрахунок поля швидкостей криволінійного турбулентного потоку.
2. Розрахунок траєкторій руху частинок.

Розрахунок поля швидкостей криволінійного турбулентного потоку включав чисельне розв'язання відомих рівняння Рейнольдса для нестисливого потоку газу з врахуванням гіпотези Бусінеска і рівняння $k-\varepsilon$ моделі турбулентності [111].

Рівняння Рейнольдса для нестисливого потоку газу з врахуванням гіпотези Бусінеска:



$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f, \text{ м/с}^2, \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \text{ с}^{-1}, \quad (5.8)$$

де u_i, u_j – усереднені компоненти вектора швидкості, м/с; t – час, с; p – усереднений тиск, Па; ρ – густина повітря, кг/м³; k – кінетична енергія турбулентності, м²/с²; v – кінематична в'язкість, м²/с; v_t – турбулентна кінематична в'язкість, м²/с; f – вектор зовнішніх сил (враховує силу тяжіння, відцентрову силу та силу Кориоліса), м/с²; $i=1..3, j=1..3$.

Кінематична турбулентна в'язкість визначалася за формулою

$$v_t = C_v \frac{k^2}{\varepsilon}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (5.9)$$

де k – кінетична енергія турбулентності, м²/с²; ε – дисипація турбулентної енергії, м²/с³; $C_v=0,09$.

Значення k та ε визначалися з відомих k - ε моделей турбулентності

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + v_t G + \varepsilon, \text{ м}^2/\text{с}^3, \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} v_t G + C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \text{ м}^2/\text{с}^4, \quad (5.11)$$

де G – турбулентна енергія; $\sigma_k=1, \sigma_\varepsilon=1,3, C_1=1,44, C_2=1,92$ – параметри моделі.

Турбулентна енергія визначалася за формулою:



$$G = \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{k}{v_t} \right) \delta_{ij} \right] \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad (5.12)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера.

Траєкторії руху частинок визначалися за допомогою числового розв'язання рівняння динаміки руху частинки [111]:

$$\frac{\partial u_c}{\partial t} = \frac{\pi d^2}{8m} C_d \rho |u - u_c| (u - u_c) + g, \text{ м/с}^2, \quad (5.13)$$

де u – швидкість потоку з врахуванням пульсацій, м/с, u_c – швидкість руху частинки, м/с; m – маса частинки, кг; d – крупність частинки, м; ρ – густина частинки, кг/м³; C_d – коефіцієнт опору, який визначався за моделлю Стейна:

$$C_d = \frac{24}{Re} + 5,48 Re^{-0,573} + 0,36, \quad (5.14)$$

де Re – число Рейнольдса.

При ударах частинок торфу об стінки та перегородки сепаратора враховувався коефіцієнт тертя ковзання частинок по сталі залежно від їх крупностей, досліджений в п. 4.6. Коефіцієнт відновлення приймався 0,4.

Моделювання руху газу виконувалося із застосуванням програмного забезпечення FlowVision 2.5.4 та КОМПАС 3D-V15. При роботі з вказаним програмним забезпеченням використовувалися довідкові матеріали [110-112].

Моделювання виконувалося у такій послідовності:

1. Створювалися 3D моделі за заданими геометричними розмірами у програмному забезпеченні КОМПАС 3D-V15, які були збережені у відповідному форматі та завантажені у FlowVision 2.5.4. Геометрична модель сепаратора типу «Зиг-заг» із жалюзійними екранами зображена на рис. 5.3.

2. Задавалися у програмному забезпеченні FlowVision 2.5.4 відповідні математичні моделі середовища та параметри його руху. Для розрахунку процесу пневматичної сепарації у криволінійному потоці задавалася вбудована модель «Несжимаемая жидкость» і вибиралися рівняння «Энергия», «Скорость», «Турбулентность» і «Частицы».



3. У вкладці «Физические параметры» завантажувалися параметри матеріалу частинок (густина, температуру), газу (густина, в'язкість та температуру), вмикалася або вимикалася взаємодія частинок між собою, їх вплив на потік газу та участь у турбулентності.

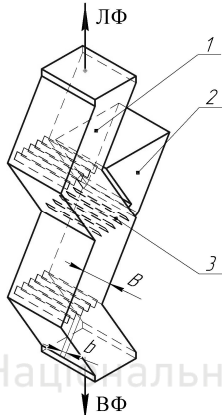


Рис. 5.3. Геометрична модель сепаратора типу «Зиг-заг» із жалюзійним екраном

4. У вкладці «Граничные условия» створювалися граничні умови: «Стінка», «Вхід повітря», «Вхід продукту» та «Вихід» та задавалися їх параметри відповідно до умов завдання. Кожен із створених параметрів закріплювався за відповідними гранями геометричної моделі потоку у вкладці «Геометрия».

5. У вкладці «Начальная сетка» була задана початкова розрахункова сітка. У місцях встановлення жалюзійних екранів створювалася більш дрібна сітка. Для спрощення розрахунків виконувався лише у центральній вертикальній площині. Для автоматичного вдосконалення розрахункової сітки задавався критерій адаптації у вкладці «Адаптация».

6. У вкладці «Общие параметры» встановлювався напрям і параметри сили гравітації, час початку та закінчення розрахунку і крок по часу. Оптимальним кроком по часу, за рекомендаціями розробників програмного забезпечення вважається крок рівний 0,1 прохідного часу. Для розрахунків, що включають взаємодії частинок, крок по часу зменшувався до 10^{-3} - 10^{-5} с.



7. Розрахунок вважався виконаним коли параметри процесу не змінюються, або коли значення нев'язки стало меншим допустимої похибки.

8. Візуалізація результатів розрахунку виконувалася у «Постпроцесорі», де створювалися відповідні об'єкти (типу лінія, площа та простір) у вкладці «Об'єкти». Для кожного об'єкту можна створити безліч двовимірних і тривимірних графіків розподілу різних параметрів (швидкості, тиску, концентрації частинок, середнього діаметру) у вкладці «Слої».

За результатами розрахунку пневматичних сепараторів типу «Зиг-заг» з кроком перегородок жалюзійного екрану 20 мм, 30 мм та 60 мм отримано графіки розподілу швидкості у вигляді заливки кольором та розрахункові траєкторії руху елементарних точок газу зображені, на рис. 5.4 та 5.5.

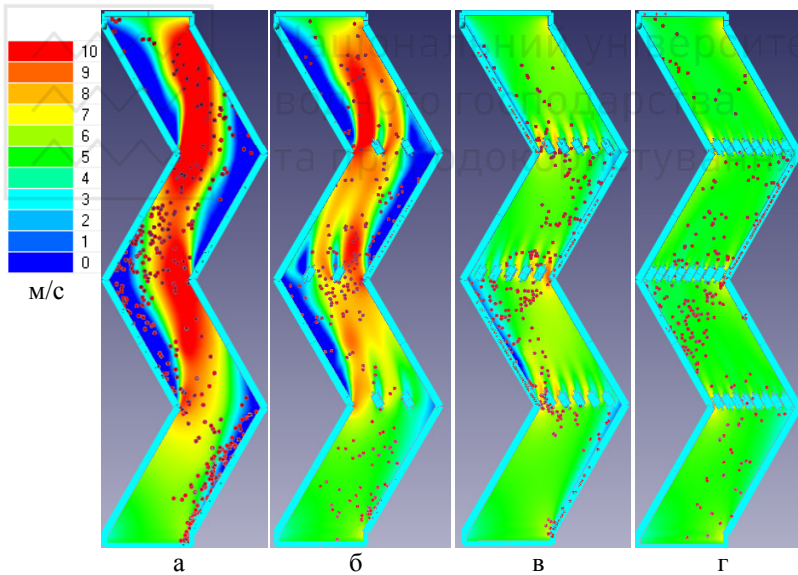


Рис. 5.4. Графік розподілу швидкості (в м/с) у центральній вертикальній площині сепаратора типу «Зиг-заг» з вхідним перерізом 210x300 мм, швидкість повітря на вході 5 м/с, сепаратор працює під розрідженням: а – без жалюзійного екрану; б – крок перегородок жалюзійного екрану 60 мм; в – 30 мм; г – 20 мм



Точками на рис. 5.4 вказані положення частинок продукту у певний момент часу.

За результатами розрахунку встановлено, що нерівномірність поля швидкості знижується при зменшенні кроку пластин жалюзійного екрану. При великих кроках пластин жалюзійних екранів у робочому об'ємі пневматичного сепаратора виникають завихрення потоку, що знижують ефективність сепарації. Але при зменшенні кроку пластин жалюзійного екрану зростають втрати тиску на кожній секції сепаратора, що веде до збільшення питомих енерговитрат на виконання пневматичної сепарації.

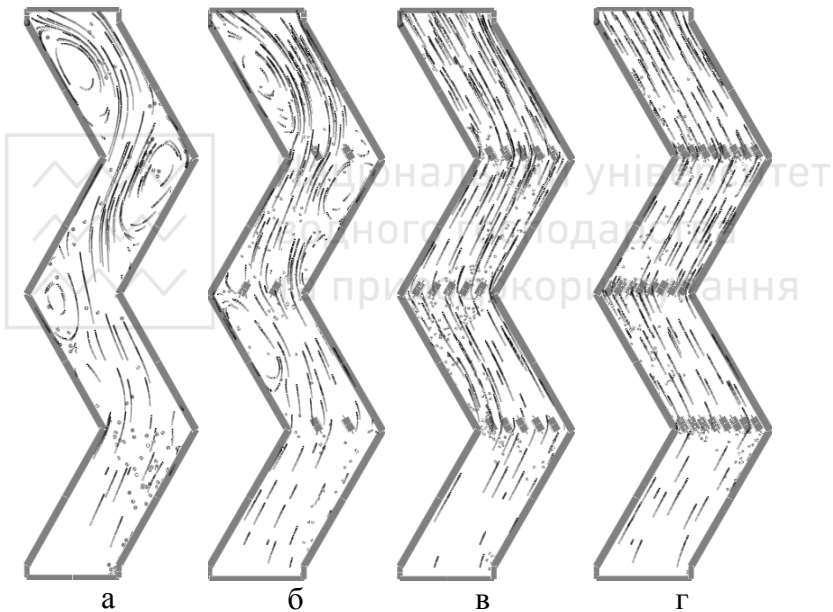


Рис. 5.5. Розрахункові траєкторії руху елементарних точок газу у центральній вертикальній площині сепаратора типу «Зиг-заг» з вхідним перерізом 210x300 мм, швидкість повітря на вході 5 м/с, сепаратор працює під розрідженням: а – без жалюзійного екрану; б – крок перегородок жалюзійного екрану 60 мм; в – 30 мм; г – 20 мм

Отже, сучасне комп'ютерне моделювання процесу пневматичної сепарації дозволяє розширити можливості з розрахун-



ку пневматичних сепараторів різної конфігурації, виконувати числові експерименти з різними параметрами та вдосконалювати конструкцію без виготовлення матеріальної моделі сепаратора.

5.4.2. Вплив конструктивних параметрів пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг» на нерівномірність поля швидкості

У п. 5.3 запропоновано за основні показники, що характеризують нерівномірно розподілений потік використати: середню швидкість, середнє квадратичне відхилення та коефіцієнт варіації швидкості. З цих показників нерівномірність поля швидкості характеризують середнім квадратичним відхиленням і коефіцієнтом варіації швидкості. В якості основного показника, що характеризує нерівномірність поля швидкості, зручніше використовувати коефіцієнт варіації швидкості V , оскільки він є критерієм (симплексом).

Серед конструктивних та режимних параметрів що визначають нерівномірність поля швидкості досліджувались: ширина пневматичного сепаратора B , крок пластин жалюзійного екрану b , середня вертикальна складова швидкості потоку повітря v_z . Для пошуку залежності $V=f(B, b, v_z)$ був виконаний повнофакторний числовий експеримент з використанням програмного забезпечення FlowVision 2.5.4. У процесі розрахунку розглядалися й інші фактори, такі як масова концентрація частинок продукту та густина частинок. Вплив цих факторів у межах оптимальних масових концентрацій (1,5-2 кг/кг) і можливих значень густини частинок 1100-2600 кг/м³ на значення коефіцієнта варіації швидкості виявився несуттєвим. Тому розрахунок коефіцієнта варіації швидкості потоку виконувався при масовій концентрації продукту 2 кг/кг та густині частинок 1100 кг/м³, яка є характерною для частинок високозольного торффу. Оскільки від 11 до 15% частинок подрібненого високозольного торффу мають більшу густину, а програмне забезпечення не дозволяє задавати різні значення густин матеріалу, то ця кількість частинок замінюється еквівалентними, з урахуванням коефіцієнта рівнопадиння частинок у повітрі 1,27-1,68.

Ширина пневматичного сепаратора змінювалася від 60 до 300 мм з кроком 120 мм, крок між пластинами жалюзійного ек-



рану становив 20, 30 та 60 мм, а нормальна швидкість на виході з сепаратора задавалась 3, 5 та 7 м/с. Ширина каналу пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг» 60 мм відповідає сепаратору з вхідним перерізом 70x90 мм, 180 мм – 210x300 мм та 300 мм – 350x450 мм.

Розрахунки виконувались для центральної вертикальної площини пневматичного сепаратора. Їх результати справедливі не для всього робочого об'єму. У пристінних зонах розподіл швидкості буде відрізнятися. Значення швидкості зменшується по мірі наближення до стінки.

У ламінарному шарі, товщина якого становить у безрозмірних одиницях y^+ 10-12 чи 0,9-1,1 мм, швидкість буде зростати пропорційно до товщини шару (у безрозмірних одиницях). У логарифмічному шарі, товщиною 12-300 безрозмірних одиниць y^+ , швидкість змінюється за логарифмічним законом [111]. Розрахункова товщина пристінного шару, в якому швидкість буде меншою за розраховану, становить від 10 до 24 мм, що відповідає від 5,1 до 13,3% об'єму у пневматичних сепараторах з шириною робочого каналу B 180 та 300 мм. У пневматичних сепараторах з шириною робочого каналу 70 мм об'єм пристінних шарів, залежно від режиму сепарації, досягає 27% об'єму. Отримані дані також були перевірені за допомогою моделювання у програмному забезпеченні FlowVision 2.5.4.

З урахуванням профілю швидкості у бокових пристінних зонах сепараторів, отримані в результаті моделювання значення коефіцієнтів варіації швидкості для перенесення з площини на об'єм будуть менші, залежно від їх типорозмірів на відхилення, що наведені в табл. 5.1.

Значення відхилення коефіцієнта варіації швидкості зростає зі зменшенням робочої швидкості та ширини робочого каналу пневматичного сепаратора. Більш точні результати моделювання будуть отримані для сепараторів з перерізами робочого каналу 350x450 мм та 210x300 мм. Найбільше відхилення результатів спостерігається в сепараторах з перерізом робочого каналу 70x90 мм.



Таблиця 5.1

Відхилення коефіцієнтів варіації швидкості при перенесенні
розрахунків з площини на об'єм (у %)

Швидкість, м/с	Переріз сепаратора, мм		
	350x450	210x300	70x90
3	5,10	5,83	20,00
5	3,50	4,17	15,00
7	2,55	3,33	10,00

Результати числового експерименту представлені у вигляді табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Результати дослідження залежності коефіцієнта варіації швидкості від конструктивних параметрів та середнього значення вертикальної складової швидкості

№ з/п	Швидкість, м/с	Ширина каналу, мм	Крок пластин жалюзійного екрану, мм	Коефіцієнт варіації швидкості для торфу родовища «Засвіття-Сатнелюк», ч.од.	Коефіцієнт варіації швидкості для торфу родовища «Старники», ч.од.	Місцевий аеродинамічний опір секції, Па
1	2	3	4	5	6	7
1	3	60	60	0,938	0,943	–
2	3	60	30	0,397	0,394	–
3	3	60	20	0,288	0,296	–
4	3	180	60	0,707	0,731	–
5	3	180	30	0,304	0,312	–
6	3	180	20	0,220	0,226	–
7	3	300	60	0,691	0,700	–
8	3	300	30	0,371	0,362	–
9	3	300	20	0,462	0,461	–



продовження табл. 5.2

1	2	3	4	5	6	7
10	5	60	60	0,980	0,978	69,16
11	5	60	30	0,324	0,335	43,62
12	5	60	20	0,256	0,249	60,06
13	5	180	60	0,670	0,694	68,24
14	5	180	30	0,274	0,284	62,52
15	5	180	20	0,197	0,200	64,77
16	5	300	60	0,694	0,688	41,48
17	5	300	30	0,323	0,319	57,51
18	5	300	20	0,320	0,318	95,89
19	7	60	60	0,761	0,742	96,82
20	7	60	30	0,366	0,367	85,71
21	7	60	20	0,254	0,251	115,26
22	7	180	60	0,653	0,657	125,54
23	7	180	30	0,267	0,265	117,44
24	7	180	20	0,176	0,177	127,86
25	7	300	60	0,665	0,694	104,87
26	7	300	30	0,287	0,292	112,51
27	7	300	20	0,278	0,275	150,90
28	5	180	180	0,942	0,929	–
29	5	180	45	0,505	0,518	–

Різниця між чисельними значеннями коефіцієнтів варіації нормальної складової швидкості у робочому об'ємі пневматичного сепаратора не перевищує 4,42%, що свідчить про незначний вплив на значення цього коефіцієнта різних гранулометричних складів подрібнених торфів родовищ «Засвіття-Ситнелюк» та «Старники».

Значення місцевого аеродинамічного опору секції сепаратора приймалося як середнє за розрахунками пневматичної сепарації торфів родовищ «Засвіття-Ситнелюк» та «Старники».

За результатами експерименту отримана емпірична залежність для розрахунку коефіцієнта варіації швидкості V :



$$V = \frac{17,5b^{1,14}}{v_z^{0,16} B^{0,17}}, \text{ ч.од.}, \quad (5.15)$$

де B – ширина каналу пневматичного сепаратора (відстань між паралельними площинами), м; b – крок пластин жалюзійного екрану (відстань між паралельними площинами), м; v_z – вертикальна складова швидкості потоку повітря (середнє значення), м/с .

Кореляційне відношення для отриманої залежності становить 0,967, максимальна відносна похибка 13,78%.

На значення коефіцієнта варіації швидкості найбільш суттєво впливає крок пластин жалюзійного екрану. Зі зменшенням кроку значення коефіцієнта варіації швидкості зменшується, але це також веде до збільшення місцевого аеродинамічного опору секції пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг». Залежність коефіцієнта варіації швидкості та місцевого аеродинамічного опору секції пневматичного сепаратора від кроку пластин жалюзійного екрану зображена на рис. 5.6.

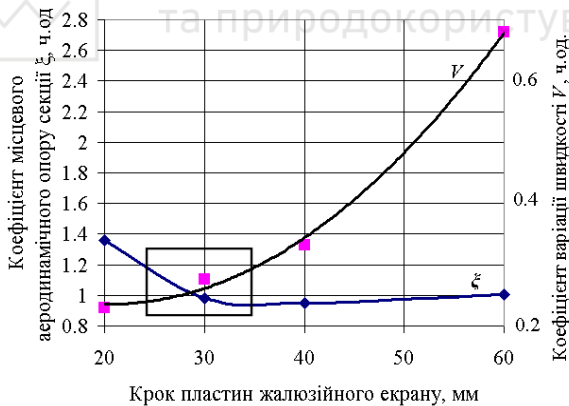


Рис. 5.6. Залежність коефіцієнта варіації швидкості та місцевого аеродинамічного опору секції пневматичного сепаратора від кроку пластин жалюзійного екрану

Мінімальні значення і коливання коефіцієнтів варіації швидкості та місцевого аеродинамічного опору секції досяга-



ються при значенні кроку пластин жалюзійного екрану 25-35 мм. Тобто, при $b=25-35$ мм досягається максимальна рівномірність поля швидкостей з мінімальними витратами енергії на процес пневматичної сепарації.

Отже, основним конструктивним параметром пневматичних сепараторів типу «Зиг-заг» із жалюзійними екранами, що визначає рівномірність поля швидкостей, є крок пластин жалюзійного екрану. Оптимальне значення кроку пластин жалюзійного екрану, при якому досягається максимальна рівномірність поля швидкостей з мінімальним аеродинамічним опором є 25-35 мм.

5.4.3 Розрахунок сепараційних характеристик за допомогою моделювання

Розрахунок сепараційних характеристик пневматичних сепараторів за допомогою моделювання дає можливість оцінити зв'язок між параметрами сепараційних характеристик та нерівномірності поля швидкостей.

Методика розрахунку сепараційних характеристик пневматичних сепараторів типу «Зиг-заг» включає моделювання руху потоку повітря з частинками у програмному забезпеченні FlowVision 2.5.4 та обробку даних моделювання в електронних таблицях Excel.

Для розрахунку сепараційної характеристики задавалися класи крупності частинок подрібнених високозольних торфів родовищ «Засвіття-Ситнелюк» та «Старники». Спочатку за відомими формулами визначалось наближене значення крупності розділення, в околі якого вибиралися чотири значення крупностей частинок. Попередній розрахунок потоку у FlowVision 2.5.4 виконувався за обраними значеннями. Якщо отримані в результаті розрахунку розділові числа мали значення 0 чи 1, то значення крупностей частинок змінювалося і проводився уточнюючий розрахунок.

На вході та виході сепаратора чи його ділянці будувався графік середньої крупності частинок. Дані з цих графіків по кожній ітерації протягом 4-5 с записувалися у файли Excel. За отриманими даними виконувався розрахунок кількості частинок кожної розрахункової крупності, що потрапили у легку та важку



фракцію. Далі розрахунок сепараційної характеристики виконувався за відомою методикою та визначалися її основні параметри: крупність розділення та середнє імовірнісне відхилення. Приклад розрахунку зображено на рис. 5.7.

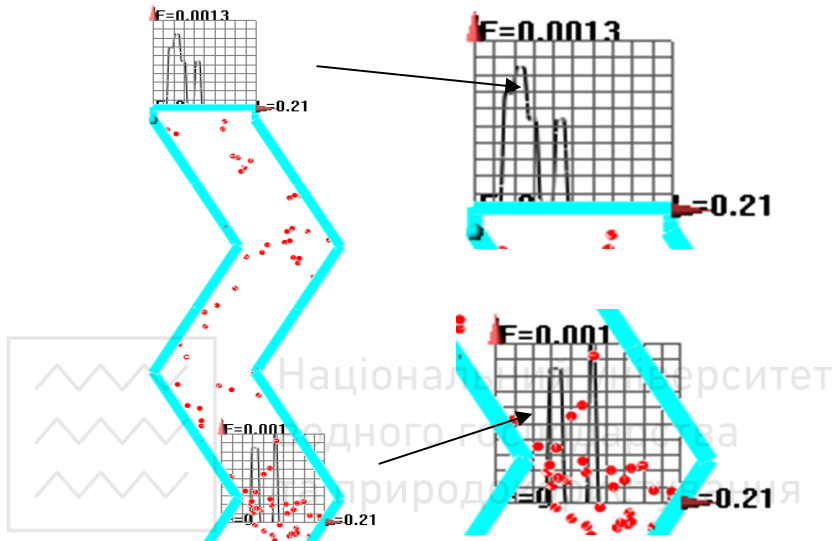


Рис. 5.7. Розрахунок параметрів сепараційних характеристик у FlowVision 2.5.4 (верхній графік фіксує крупність частинок що потрапляють у легку фракцію, нижній – у важку)

Приклади сепараційних характеристик, отриманих на основі числового моделювання для пневматичних сепараторів типу «Зиг-заг» з різним кроком пластин жалюзійних екранів зображено на рис. 5.8.

Оскільки розрахунок сепараційних характеристик виконувався для центральної вертикальної площини сепаратора, то через наявність пристінних зон біля бокових стінок фактичні сепараційні характеристики відрізняються від розрахункових. Робочий об'єм пристінних зон становить від 5,1 до 13,3%, і в цих зонах продукт може пройти лише з частковим розділенням. Це приведе до зменшення значень розділових чисел у легких фрак-



ція на 5,1-13,3%, значення E_{pm} у дослідних діапазонів зростає на 2,36%, а значення крупності розділення зменшиться на 4,44%

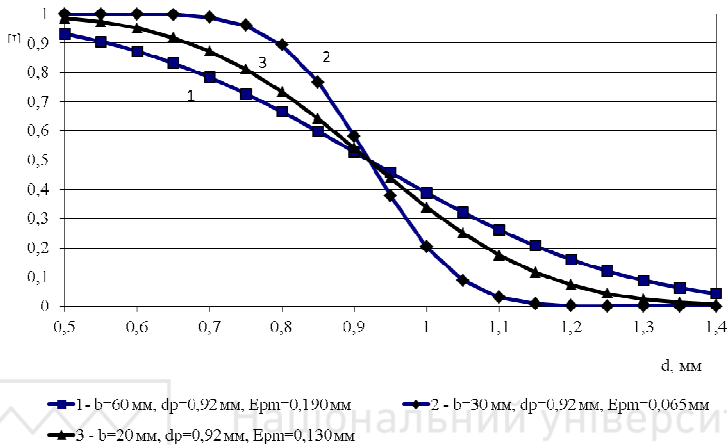


Рис. 5.8. Розрахункові сепараційні характеристики сепараторів типу «Зиг-заг» (переріз 210 мм × 300 мм) з кроком пластин жалюзійних екранів 60 мм, 30 мм та 20 мм

Із зменшенням кроку пластин жалюзійних екранів сепараторів типу «Зиг-заг» значення середньоквадратичного відхилення швидкості зменшується, а значення параметру сепараційної характеристики E_{pm} спочатку зменшується, досягаючи деякого мінімального значення, після чого починає знову зростати.

Графік залежності між середнім імовірнісним відхиленням від крупності розділення E_{pm} та середньоквадратичним відхиленням швидкості s , для якого передбачена лінійна залежність (5.6), зображено на рис. 5.9.

Коефіцієнт кореляції для отриманої лінійної залежності становить 0,856, що свідчить про тісний зв'язок між середнім імовірнісним відхиленням від крупності розділення E_{pm} та середньоквадратичним відхиленням швидкості s . При зменшенні значення середньоквадратичного відхилення спостерігається значне розсіювання даних, максимальна похибка досягає 63%.



Це свідчить про неможливість практичного використання отриманого рівняння регресії.

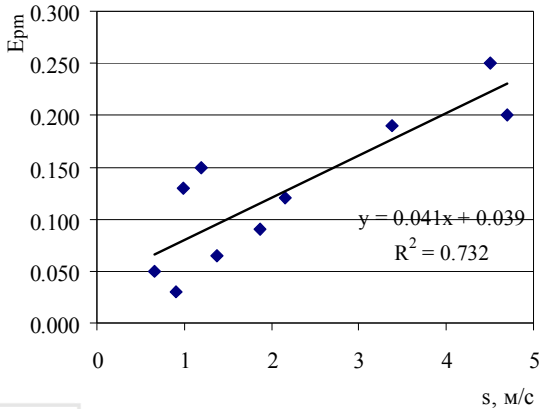


Рис. 5.9. Графік залежності між значенням E_{pm} та середньоквадратичним відхиленням швидкості

Відповідно до формули (5.6) відношення середнього імовірнісного відхилення від крупності розділення до цієї крупності пропорційне коефіцієнту варіації швидкості і не залежить від густини частинок. За допомогою числового моделювання це співвідношення було досліджено у перерахунку для однієї секції сепаратора:

$$\frac{E_{pm1}}{d_p} = f(V), \quad (5.16)$$

де E_{pm1} – середнє імовірнісне відхилення від крупності розділення, що відповідає одній секції сепаратора типу «Зиг-заг».

При отриманні співвідношень між параметрами сепаратійних характеристик розглядалися густини частинок: 1100 кг/м^3 – характерні для частинок торфу та 2600 кг/м^3 – властиві мінералам золи.

Графік залежності відношення E_{pm1}/d_p від коефіцієнта варіації швидкості у робочому об'ємі пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг» зображено на рис. 5.10.

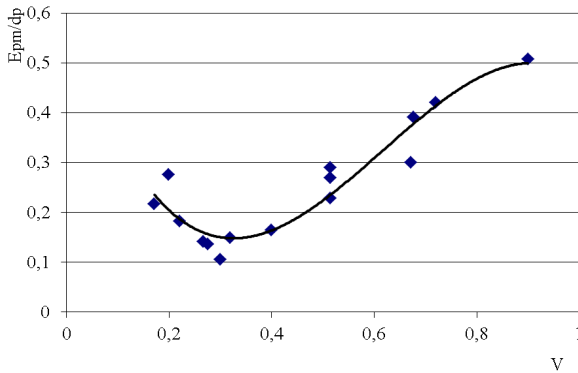


Рис. 5.10. Графік залежності $\frac{E_{pm1}}{d_p} = f(V)$

Для залежності відношення E_{pm1}/d_p від коефіцієнта варіації швидкості у робочому об'ємі сепаратора отримане рівняння регресії:

$$\frac{E_{pm1}}{d_p} = -3,38V^3 + 6,34V^2 - 3,06V + 0,60. \quad (5.17)$$

Коефіцієнт детермінації для отриманої залежності становить 0,908, максимальна похибка не перевищує 17%. За рахунок перенесення розрахунків з площини на робочий об'єм сепаратора похибка отриманого відношення E_{pm}/d_p сепаратора може досягати 7,06%.

При значеннях коефіцієнта варіації швидкості від 0,3 до 0,9 залежність відповідає лінійному закону з коефіцієнтом кореляції 0,974. При наступному зменшенні коефіцієнта варіації швидкості ця залежність порушується через погіршення умов проходження частинок через жалюзійні екрани при зменшенні відстані між їх пластинами.

Отримана залежність на досліджуваному діапазоні значень має екстремальне значення. Мінімальні значення відно-



шення E_{pm1}/d_p , а також значення E_{pm} досягаються при величині коефіцієнта варіації швидкості у потоці пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг» 0,3-0,4, що відповідає кроку пластин жалюзійного екрану 35-45 мм. Ці значення відповідають режиму пневматичної сепарації з максимальною ефективністю.

Отже, за допомогою комп'ютерного моделювання процесу пневматичної сепарації отримана поліноміальна залежність третьої степені між параметрами сепараційних характеристик (відношенням E_{pm1}/d_p) та коефіцієнтом варіації швидкості, що характеризує нерівномірність поля швидкості [113].

Конструктивні рішення використані при проектуванні пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг» з жалюзійними екранами захищені патентом України на корисну модель [114].

5.5. Експериментальні дослідження сепаратора типу «Зиг-заг» з жалюзійними екранами

Задачею експериментальних досліджень сепаратора типу «Зиг-заг» з жалюзійними екранами є перевірка адекватності сепараційних характеристик, отриманих за допомогою числового моделювання.

Експериментальні дослідження виконувались на лабораторному сепараторі типу «Зиг-заг», зображеному на рис. 4.1. Жалюзійний екран був виконаний зі сталених пластин, встановлених з кроком 30 мм. В експериментах використовувались зразки торфів родовищ «Старники» та «Засвіття-Ситнелюк», подрібнені до класу крупності 0-3 мм. Середня швидкість у робочому об'ємі сепаратора становила 5 м/с. Масова концентрація продукту становила 2 кг/кг повітря. В результаті експерименту було отримано важку та легку фракції, після чого визначений гранулометричний склад цих фракцій, за яким розраховані сепараційні характеристики.

Розрахункові сепараційні характеристики враховували кількість стадій пневматичної сепарації та фракційний склад торфу. Вони були розраховані у наступній послідовності:



1. Коефіцієнт варіації швидкості був розрахований за формулою (5.15);

2. Значення d_p та E_{pm} для фракцій з різною густиною були розраховані за формулами (5.2) і (5.17), після чого визначена середньозважена сепараційна характеристика однієї секції сепаратора типу «Зиг-заг» з жалюзійним екраном;

3. Сепараційна характеристика сепаратора була розрахована відповідно до компоновки секцій та місця подачі живлення відповідно до рекомендацій [53; 115-116] по розрахунку схем збагачення.

Сепараційні характеристики отримані у результаті експериментів та на основі моделювання зображені на рис. 5.11 та 5.12.

Кореляційне відношення між експериментальними та розрахунковими даними становить 0,914, а максимальна похибка не перевищує 19%.

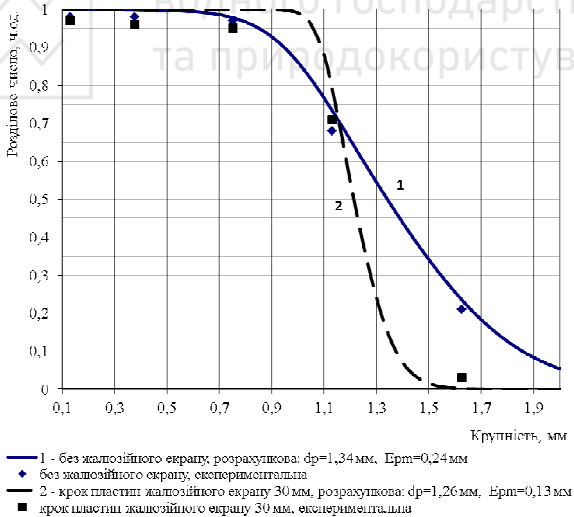
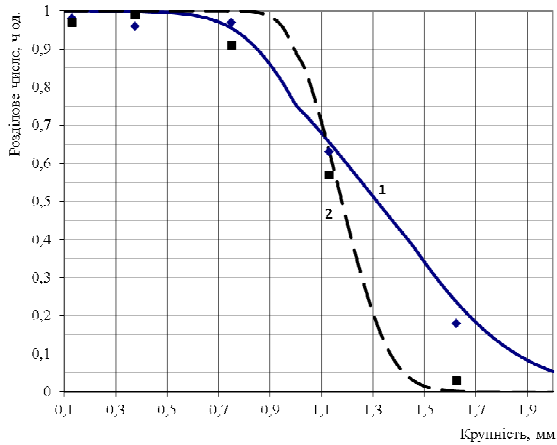


Рис. 4.17. Сепараційні характеристики отримані при сепарації високозольного торфу родовища «Старники» на сепараторі типу «Зиг-заг»



- 1 - без жалюзійного екрану, розрахунок: $d_p=1,32$ мм, $E_{pm}=0,30$ мм
- ♦ без жалюзійного екрану, експериментальні
- 2 - хрокіпластин жалюзійного екрану 30 мм, розрахунок: $d_p=1,18$ мм, $E_{pm}=0,10$ мм
- хрокіпластин жалюзійного екрану 30 мм, експериментальні

Рис. 4.18. Сепараційні характеристики отримані при сепарації високозольного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк» на сепараторі типу «Зиг-заг»

Отже, в результаті порівняння експериментальних та теоретичних сепараційних характеристик для сепаратора типу «Зиг-заг» з жалюзійними екранами та без них отримана достатня збіжність даних, що підтверджує адекватність запропонованої методики розрахунку.



6. ТЕХНОЛОГІЧНІ СХЕМИ ЗБАГАЧЕННЯ ВИСОКОЗОЛЬНОГО ТОРФУ

6.1. Пневмо-вібраційна технологічна схема збагачення високозольного торфу

Для обґрунтування технологічної схеми збагачення виконаний фракційний аналіз подрібненого високозольного торфу до крупності 0-3 мм. Вилучення золи з елементарними фракціями подрібненого високозольного торфу приведене в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Вилучення золи з елементарними фракціями високозольного торфу родовища «Старники»

Густина фракції ($\times 10^3$), кг/м ³	Вилучення золи в елементарну фракцію %			Сума
	0,1-0,5 мм	0,5-1 мм	1-3 мм	
<1,3	2,21	0,22	1,11	3,54
1,3-1,4	0,76	0,64	7,72	9,12
1,4-1,5	3,88	0,67	3,41	7,96
1,5-1,6	1,29	0,50	2,44	4,23
1,6-1,8	4,00	1,17	5,23	10,40
>1,8	47,86	7,06	9,82	64,74
Сума	60,01	10,26	29,75	100,00

Для виділення високозольної фракції застосовувалися методи пневматичної та вібраційної сепарації. Відповідні лінії цих сепарацій відображені на рис. 6.1.

Клас крупності 0-0,1 мм не розділяється в гравітаційному полі через переважання сил Стокса. Його вміст незначний і в дослідному зразку не перевищує 3%. Елементарна фракція з крупністю 0,1-0,5 мм та густиною більшою 1800 кг/м³ має максимальне вилучення золи, тому схема збагачення має бути побудована з урахуванням максимального вилучення саме цієї фракції.

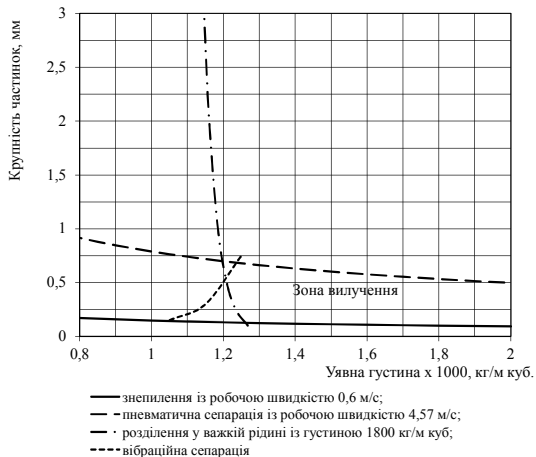


Рис. 6.1. Графік ліній розділення подрібненого торфу

Лінії розділення пневматичною сепарацією розраховані на основі формули Г.К. Смишляєва, а лінія розділення вібраційною сепарацією визначена експериментально.

Лабораторні випробування зі збагачення високозольних торфів родовищ «Старники» та «Засвіття-Ситнелюк» були виконані за технологічними схемами, наведеними на рис. 6.2 і 6.3.

Пневматична сепарація здійснювалась при робочих швидкостях повітряного потоку 3,5 та 5,21 м/с, оскільки основна частина золи торфів родовищ «Засвіття-Ситнелюк» та «Старники» зосереджена у класах крупності 0-1 та 0-0,5 мм, відповідно. Досягнуто вилучення горючої маси 79,32% при збагаченні торфів родовища «Засвіття-Ситнелюк» та 93,51% при збагаченні торфів родовища «Старники». Результат можна покращити, виділивши пневматичною сепарацією два, більш вузькі класи крупності та здійснивши їх окрему вібраційну сепарацію [62].

Обґрунтовані і експериментально перевірені технологічні схеми збагачення некондиційного високозольного торфу з отриманням кондиційного по зольності концентрату для виготовлення торфових паливних гранул та брикетів є, на жаль, складними та малопродуктивними. Тому вони потребують спрощення і удосконалення.

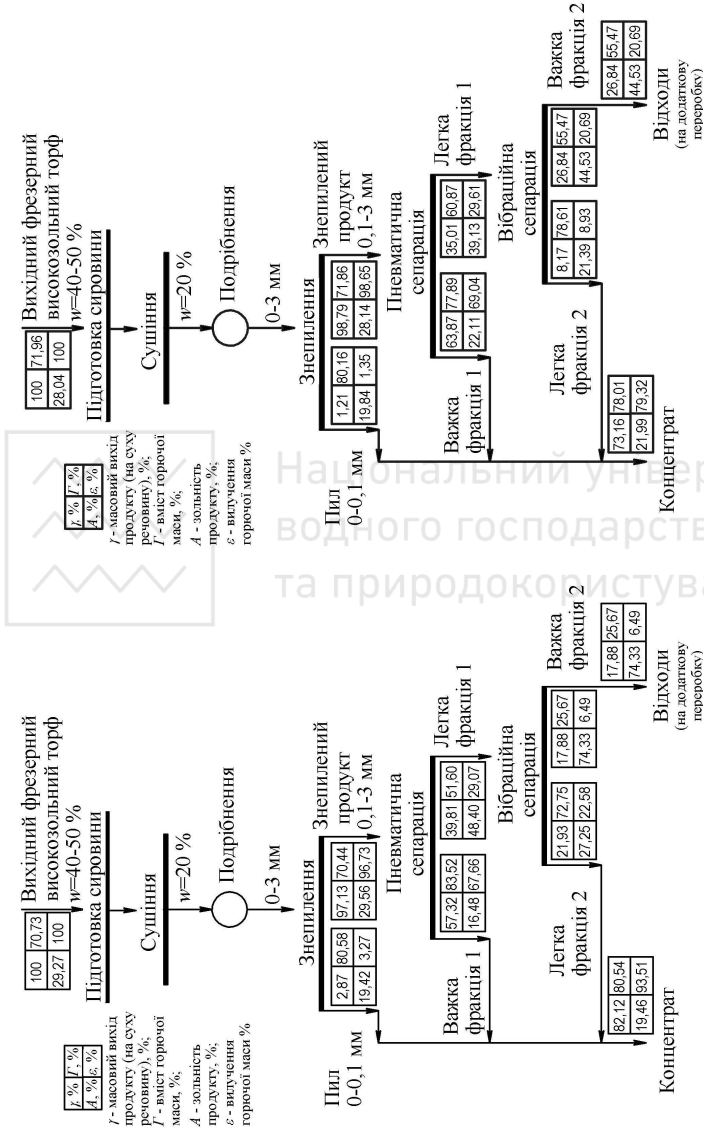


Рис. 6.3. Кількісно-якісна технологічна схема збагачення високозольного торфу родовища «Засвіття-Ситнелюк»

Рис. 6.2. Кількісно-якісна технологічна схема збагачення високозольного торфу родовища «Старники»

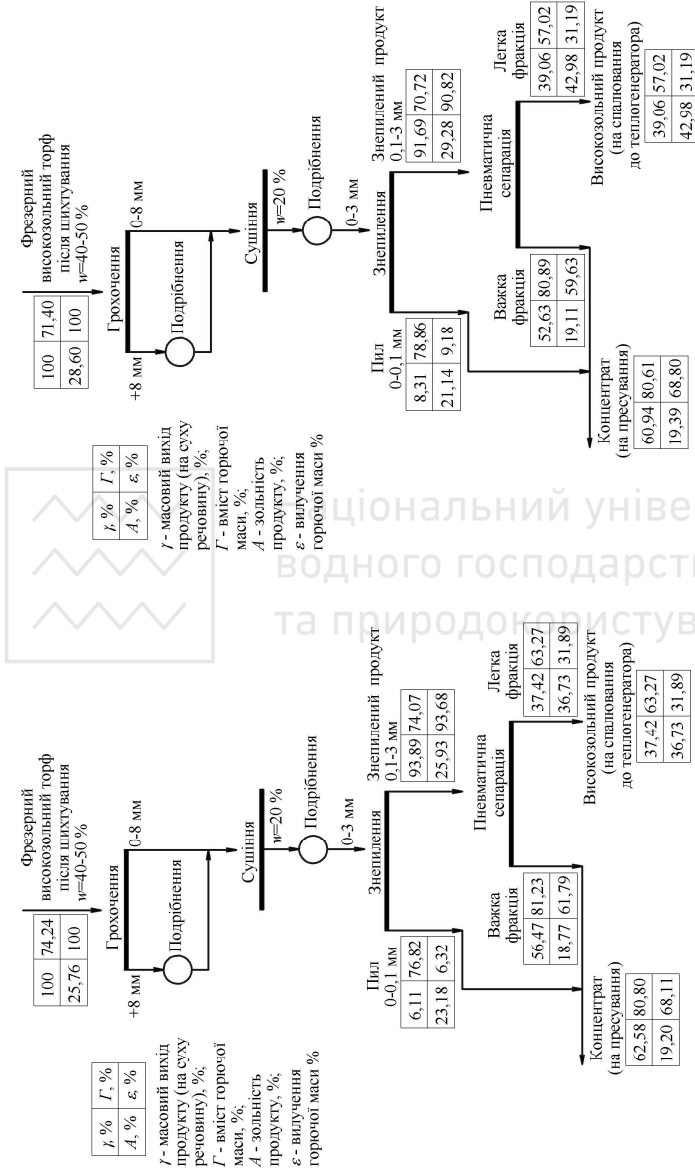


6.2. Обґрунтування технологічної схеми збагачення високозольного торфу на виробництвах палив

На виробництві торфових брикетів та пелет [72; 117] сировина, якою є фрезерний торф вологістю 40-50%, спрямовується на підготовку, що включає грохочення по крупності 5 або 8 мм та дроблення надрешітного продукту. Підготовлену сировину спрямовують на наступне сушіння, подрібнення та пресування. Для підготовки сушильного агенту сировину вологістю 40-50% розділяють на два потоки, один з яких спрямовують на пресування, а інший – на спалювання для підготовки сушильного агенту процесу сушіння. Із досвіду роботи торфобрикетних заводів відомо, що на підготовку сушильного агенту спрямовують близько 30% сировини вологістю 40-50%. Тобто, на спалювання направляється торф, який містить 50-65% баластних включень (волога та зола).

Для збільшення ефективності використання горючої маси високозольного торфу у виробництві торфових брикетів та гранул запропоновано удосконалити технологічну схему, замінивши «баласт золи на баласт вологи» у продукті, що направляється на спалювання до теплогенератора. Тобто, при виробництві брикетів та гранул з високозольного торфу висушений продукт слід розділяти на два продукти: кондиційний та високозольний. При цьому кондиційний продукт має бути спрямований на пресування для виготовлення паливної продукції, а високозольний (що містить 30% горючої маси вихідного потоку) – на спалювання до теплогенератора для отримання сушильного агенту. Запропоноване технологічне рішення зображене у вигляді схем (рис. 6.4 та 6.5) та відпрацьоване на високозольних торфах родовищ «Старники» та «Засвіття-Ситнелюк».

Врахувавши те, що зольність кондиційного продукту, який направляється на виготовлення палива, повинна становити 20% (максимально), а вилучення горючої маси у високозольний продукт, що направляється для підготовки сушильного агенту, дорівнює 30%, знайдемо масовий вихід і зольність високозольного продукту з відомої системи рівнянь:





$$\begin{cases} 100 \cdot A_0 = XY + (100 - X) \cdot A_1, \\ \varepsilon_1 = \frac{X \cdot (100 - Y)}{100 - A_0}, \end{cases} \quad (6.1)$$

де A_0 та A_1 – зольність вихідної сировини та кондиційного продукту, який потрібно отримати ($A_1=20\%$); X та Y – масовий вихід та зольність високозольного продукту, %; ε_1 – планове вилучення горючої маси ($\varepsilon_1=30\%$).

У результаті розв'язання системи рівнянь отримані значення масового виходу X та зольності Y високозольного продукту в залежності від зольності вихідної торфової сировини A_0 . Результати розв'язку рівнянь (6.1) представлені на рис. 6.6.

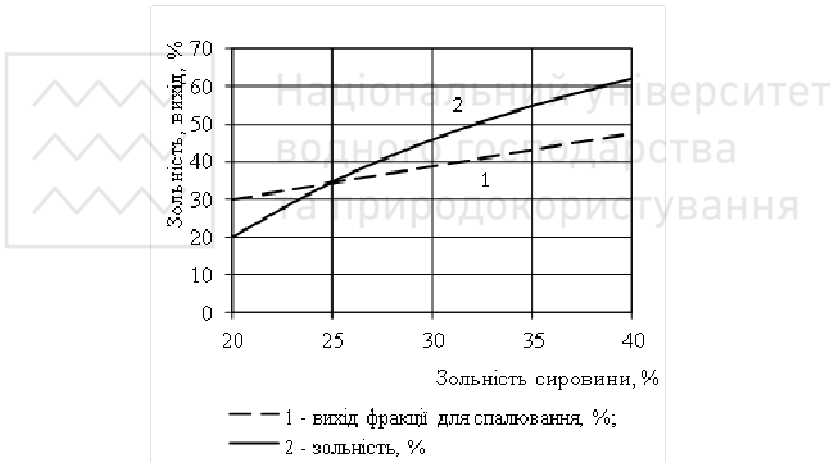


Рис. 6.6. Залежність масового виходу та зольності високозольного продукту відходів від зольності сировини

Виділення високозольного потоку з необхідними параметрами можна забезпечити за допомогою пневматичної сепарації.

Вологість частинок торфу після сушіння становить 20%, а вологість мінеральної частини близька до нуля. Тому вологість продукту, який буде спрямовуватись на спалювання, не перевищуватиме 10%. Отже, при використанні запропонованого



способу кількість баластних компонентів у відходах, які спрямовуються на спалювання, майже не зміниться.

Знепилення висушеного та подрібненого продукту перед пневматичною сепарацією дозволяє збільшити частку кондиційного продукту.

Такий спосіб виготовлення торфового палива має наступні переваги:

- для виробництва використовується некондиційний по зольності торф;
- мінеральна частина високозольного торфу інтенсифікує процес сушіння завдяки високій теплоємності;
- зола після спалювання може використовуватись для виготовлення бетонів, оскільки її хімічний склад близький до складу цементу і вона також піддається температурній активації.

Потрібні результати з розділення продукту досягаються лише знепиленням і пневмосепарацією з розділенням по крупності 0,5-1,0 мм.

Отже, для реалізації процесу збагачення високозольного торфу на підприємствах потрібно лише забезпечити подрібнення висушеного торфу до крупності 0-3 мм, його знепилення та пневматичну сепарацію. Для виготовлення торфового палива за такою схемою підготовки сировини потрібно використовувати суміш пилу та важкої фракції пневматичної сепарації. На спалювання до теплогенератора треба спрямовувати легку фракцію пневматичної сепарації. Застосування запропонованої технологічної схеми дозволить використати для виробництва палив високозольний торф із зольністю до 35% [118-120].

6.3. Збагачення високозольного торфу на виробництвах торфових палив

6.3.1. Збагачення високозольного торфу на виробництвах торфових брикетів. В Україні працює один торфобрикетний завод, сушіння сировини на якому виконується за допомогою барабанних парових трубчастих сушарок «Цемаг». Цей завод випускає 80 тис. т торфових брикетів на рік, що складає



близько 40% усього обсягу українського виробництва торфових брикетів.

Для реалізації процесу виготовлення торфових брикетів на торфобрикетних заводах із застосуванням барабанної парової трубчастої сушарки «Цемаг» запропонована схема ланцюга апаратів (рис. 6.7).

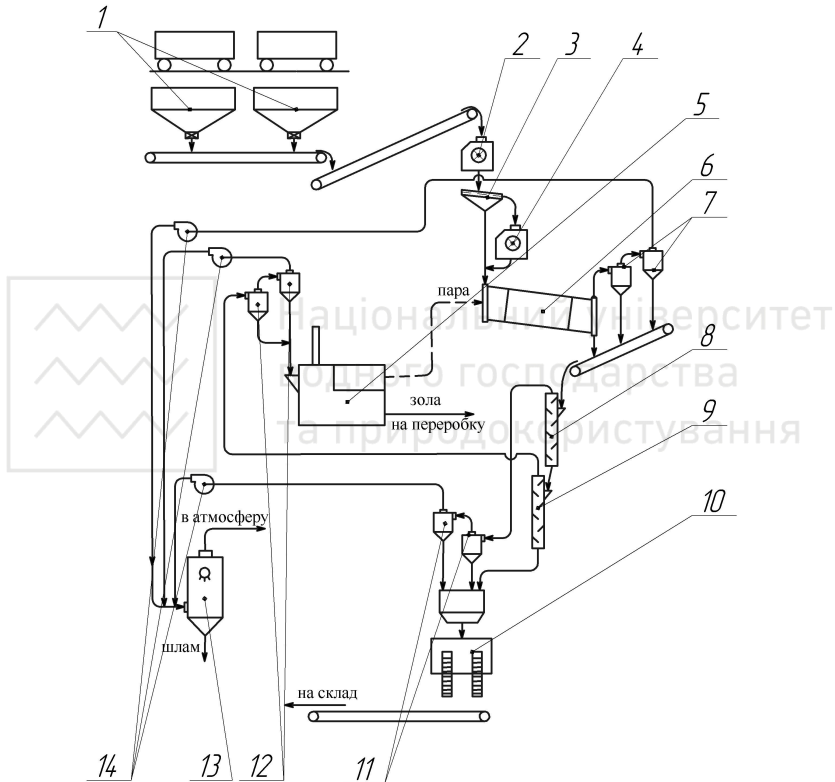


Рис 6.7. Схема ланцюга апаратів виробництва торфових брикетів із високозолистого торфу (на базі сушарки «Цемаг»): 1 – бункери сировини; 2 – молоткова дробарка основного подрібнення; 3 – грохот; 4 – молоткова дробарка додаткового подрібнення; 5 – теплопарогенератор; 6 – сушарка «Цемаг»; 7, 11, 12 – циклони; 8 – пневматичний сепаратор типу «Зиг-заг» для знепилення; 9 – пневматичний сепаратор типу «Зиг-заг»; 10 – штемпельний прес; 13 – мокрий скрубєр; 14 – вентилятори



Процес виготовлення торфових брикетів із високозольного торфу здійснюється таким чином. Торф з вагонів завантажується у бункери 1. В один з бункерів потрібно завантажувати кондиційний за показником зольності торф, а в інший – високозольний. З двох бункерів торф змішують так, щоб утворилася шихта із зольністю 25-30%. За допомогою стрічкового конвеєра ця шихта направляється на подрібнення до молоткової дробарки 2. Подрібнений продукт спрямовують на грохот 3 із розміром чарунок 5 мм, після чого надрешітний продукт направляють на додаткове подрібнення у молотковій дробарці 4. Продукт, подрібнений у дробарці 4, та підрешітний продукт грохочення спрямовують на сушіння у паровій трубчастій сушарці «Цемаг» 6. Пара для сушарки готується теплопарогенератором 5. У процесі сушіння пара не контактує з торфом, оскільки він переміщається в трубах а пара – у міжтрубному просторі. Сушильним агентом є повітря, яке, як і торф, рухається по трубах. У сушарці торф висушується до вологості 15-20% та додатково подрібнюється. Дрібна фракція висушеного торфу відділяється від сушильного агенту циклонами 7 та разом із крупною фракцією направляється на знепилення у сепараторі типу «Зиг-заг» з робочою швидкістю потоку 0,5-1,0 м/с. Швидкість потоку повинна регулюватися і залежить від зольності отриманого пилу. Отриманий пил, зольність якого не перевищує 23%, відділяється від повітряного потоку циклонами 11 і направляється у бункер пресу. Знепилений продукт направляється на пневматичну сепарацію у сепараторі типу «Зиг-заг» 9 з робочою швидкістю повітряного потоку 3,2-5,5 м/с. Швидкість потоку регулюється так, щоб важка фракція мала зольність нижчу 23%, а вилучення горючої маси до легкої фракції відносно вихідної сировини становило 30%. Масовий вихід і зольність легкої фракції, залежно від зольності вихідної сировини, визначається за графіком (рис. 6.6.). Важку фракцію пневматичної сепарації направляють у бункер пресу 10, а легку осаджують у циклонах 12 та спалюють у тепло-парогенераторі для генерації пари. Із суміші пилу та важкої фракції пневматичної сепарації виготовляють брикет – шляхом пресування одержаної суміші в пресі 10. Готову продукцію направляють на склад готової продукції. Очищений су-



шильний агент з циклонів 7 та повітря з циклонів 11, 12 направ- ляється на очищення до мокрого скрубера 13.

Схема виробництва торфових брикетів із застосуван- ням пневмогазової шахтномливної сушарки. Сушарки цього типу є найбільш поширеними в Україні. Ефективне збагачення високозольного торфу при застосуванні даного типу сушарки обмежене внаслідок переподрібнення торфу шахтним млином. На виробництвах із застосуванням пневмогазової шахтномливної сушарки найпростіше виконати кондиціонування висушеної сировини за допомогою пневмоосаджувальної камери. Для реалізації процесу кондиціонування в цих умовах запропонована техно- логічна схема ланцюга апаратів, зображена на рис. 6.8.

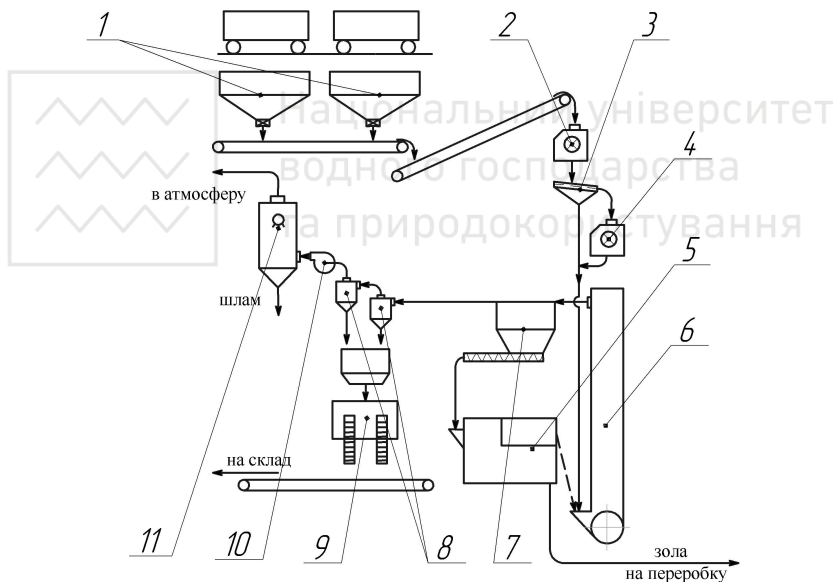


Рис. 6.8. Схема ланцюга апаратів виробництва торфових брикетів із кондиціонуванням високозольного торфу (на базі пневмогазової шахтномливної сушарки): 1 – бункери сировини; 2 – молоткова дробарка основного подрібнення; 3 – грохот; 4 – молоткова дробарка додаткового подрібнення; 5 – теплогенератор; 6 – пневмогазова шахтномливна сушарка; 7 – осаджувальна камера; 8 – циклони; 9 – штемпельний прес; 10 – вентилятор; 11 – мокрий скрубер



Технологічна лінія працює таким чином. Підготовка сировини здійснюється аналогічно схемі, зображеній на рис. 6.8. Підготовлений продукт направляють на сушіння у пневмогазовій шахтноmlinній сушарці 6, де він додатково подрібнюється. Димові гази для сушарки готуються у теплогенераторі 5. У процесі сушіння димові гази (сушильний агент) безпосередньо контактують з частинками торфу. У сушарці торф висушується до вологості 18-20%. На виході із сушарки важка фракція, із підвищеною зольністю, відбирається осаджувальною камерою 7 і подається на спалювання до теплогенератора 5, а легка – відокремлюється від пилогазового потоку циклонами 8 та направляється у бункер пресу 9.

Застосування запропонованої технології забезпечує зниження зольності торфових брикетів на 3-7% у порівнянні із зольністю вихідної сировини, що дає можливість виготовляти кондиційні торфові брикети із торфу, що має зольність до 28%.

Ця технологія успішно працює на Маневицькому торфозаводі державного підприємства «Волиньторф» з 2011 року (рис. 6.9):

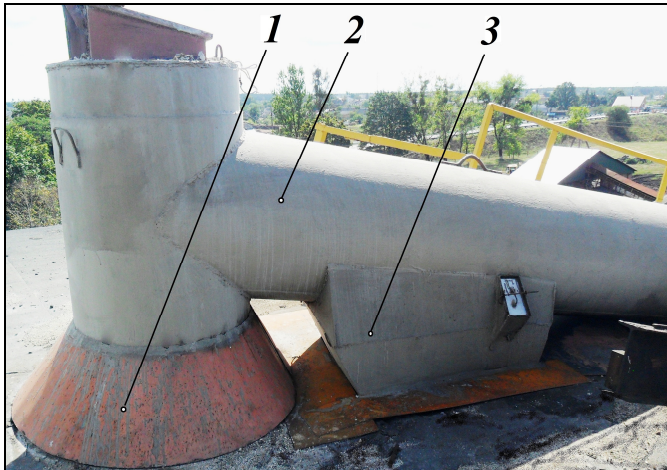


Рис. 6.9. Осаджувальна камера на газоході сушарки: 1 – шахта; 2 – газохід; 3 – осаджувальна камера



6.3.2. Збагачення високозольного торфу на виробництві пелет. Виробники пелет сьогодні відчувають дефіцит торфової сировини та змушені переробляти навіть некондиційну за зольністю сировину, внаслідок чого отримують некондиційну продукцію. Тому застосування запропонованої технологічної схеми виготовлення пелет з низькокондиційної високозольної сировини вирішує питання якості готової продукції.

Схема ланцюга апаратів виробництва пелет з високозольного торфу зображена на рис. 6.10. Пелети виготовляють наступним чином. Сировину вологістю 40-50% завантажують у бункери 1. В один з бункерів потрібно завантажувати некондиційну сировину а в інший – кондиційну. Далі сировину шихтують з отриманням зольності шихти 25-30%. Утворена шихта конвеєром подається на грохот 2 по крупності 5 мм. Після грохочення надрешітний продукт направляють на подрібнення молотковою дробаркою 3. Подрібнений продукт об'єднується з підрешітним і подається на сушіння до барабанної сушарки 5. Сушильний агент для сушарки готується у теплогенераторі 4. Висушений продукт осаджується циклонами 6 та направляється на знепилення у пневматичному сепараторі типу «Зиг-заг» 7. Робоча швидкість потоку повітря при знепиленні повинна становити 0,5-1,0 м/с і регулюватися залежно від зольності пилу. Знепилений продукт спрямовують на пневматичну сепарацію у сепараторі типу «Зиг-заг» 8, із робочою швидкістю потоку повітря 3,2-5,5 м/с. Важка фракція пневматичної сепарації має кондиційну зольність і направляється на додаткове подрібнення молотковою дробаркою 9, після чого об'єднується з пилом. Об'єднаний продукт пресують пресом-гранулятором 10. Легка фракція пневматичної сепарації осаджується циклонами 15 та подається на спалювання до теплогенератора. Гранули, утворені в процесі грануляції ковшовим елеватором 12, подаються в охолоджувач 13. Після охолодження гранули направляються на контрольне грохочення на грохоті 14. Підрешітний продукт повертається у бункер гранулятора, а надрешітний, яким є пелети – на склад готової продукції. Сушильний агент після циклонів 6 та повітря піс-



ля циклонів 10 спрямовуються на додаткове очищення у мокрому скрубєрі 16.

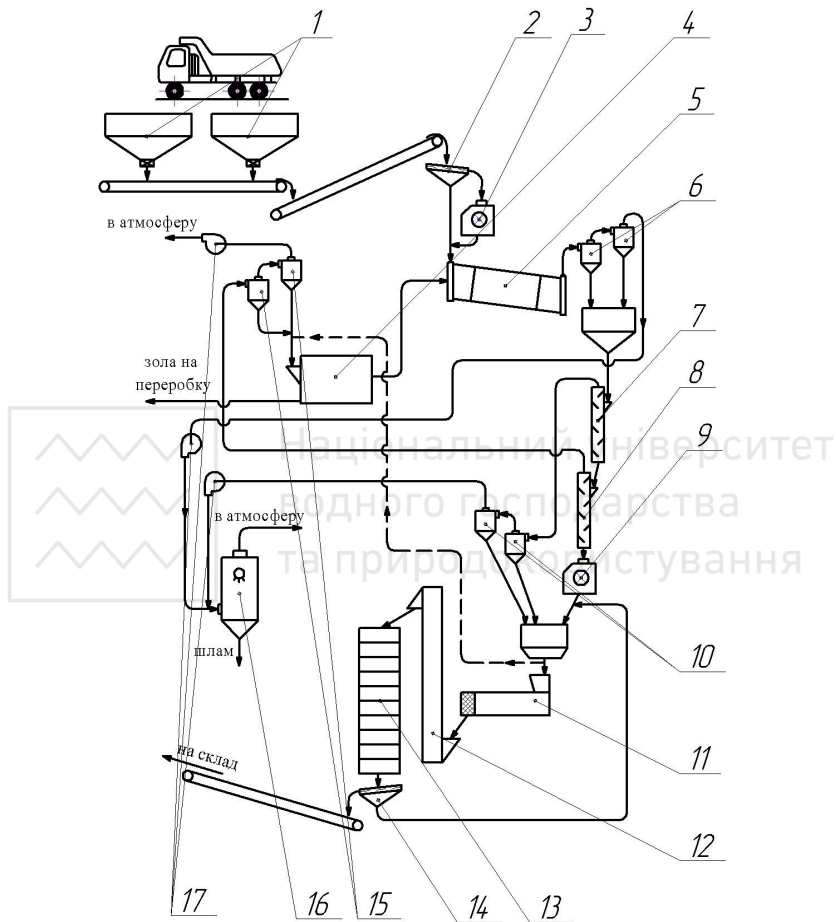


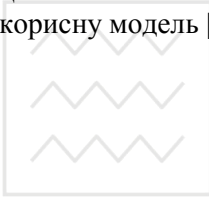
Рис. 6.10. Схема ланцюга апаратів для виробництва пелет із високозольного торфу: 1 – бункери сировини; 2 – грохот; 3, 9 – молоткові дробарки; 4 – теплогенератор; 5 – сушарка барабанна; 6, 10, 15 – циклони; 7 – пневматичний сепаратор типу «Зиг-заг» для знепилення; 8 – пневматичний сепаратор типу «Зиг-заг»; 11 – прес-гранулятор; 12 – елеватор; 13 – охолоджувач; 14 – контрольний грохот; 16 – мокрий скрубєр; 17 – вентилятори



У даних ланцюгах апаратів теплогенератори повинні бути пристосовані до спалювання торфу із зольністю 30-45%, і мати ефективну систему видалення золи з теплогенератора. Утворена зола за груповим хімічним складом близька до складу цементу і пройшла часткову температурну активацію, тому її можна використовувати при виготовленні бетонів.

Пневматичну сепарацію високозольного торфу потрібно виконувати сепараторами типу «Зиг-заг» з жалюзійними екранами. При потребі можна використати сепаратори типу «Зиг-заг», каскадно-гравітаційні сепаратори з пересипними полицями чи їх аналогами. Вибір та розрахунок обладнання для пневматичної сепарації високозольного торфу наведений у додатку А

Запропонована технологія виготовлення палив з некондиційного високозольного торфу захищена патентом України на корисну модель [121].





7. ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ ВИСОКОЗОЛЬНОГО ТОРФУ НА ВИРОБНИЦТВАХ ПАЛИВ

Порівняльна економічна оцінка виробництв торфових пелет із застосуванням збагачення сировини і без такого проводилася на прикладі технологічних ліній виготовлення пелет продуктивністю 15,84 тис. т/рік, або 2,2 т/год. по готовій продукції. Розрахункова вологість пелет в обох випадках становить 18%, зольність також 18%.

У базовому варіанті розглядалася відома схема виготовлення пелет із торфу зольністю 18% та вологістю 45%. На спалювання до теплогенератора подається 30% горючої маси вихідної сировини, що відповідає масовому виходу на робочу масу також 30%. Потреба у сировині за цим варіантом становить 34992 т/рік.

У новому варіанті сировиною для виготовлення пелет є два види торфу, які змішуються у відношеннях (по масі) 50 на 50%. Вологість та зольність першого становить 45% та 20%, а другого – 40% і 30%, відповідно. Тобто один торф має граничну зольність а інший – некондиційну. Після шихтування отримуємо шихту із зольністю 25,22 та вологістю 42,5%. Витрати сировини становлять 36000 т/рік. На спалювання до теплогенератора направляється 30% горючої маси загального потоку, або високозольна частина виділена пневматичною сепарацією. Зольність продукту, який подають на грануляцію, при цьому становить 18%.

Розрахунок очікуваного річного економічного ефекту виконаний ДП «НДІ «Кривбаспроект» в цінах 2015 року.

Зведені результати розрахунку очікуваного річного економічного ефекту від впровадження процесу збагачення високозольного торфу наведені у табл. 7.1.

Низькокондиційна високозольна торфова сировина є альтернативним ресурсом, оскільки її вартість значно нижча. При виробництві пелет з високозольного торфу рентабельність складає 17,48%, що на 4,09% вище, ніж при виробництві пелет з кондиційного торфу.



Таблиця 7.1

Зведені результати розрахунку очікуваного річного економічного ефекту від впровадження процесу збагачення високозольного торфу

Найменування показників	Величина показника	
	базовий варіант	новий варіант
Річна продуктивність заводу з вихідної сировини (фрезерного торфу), т	34 992,0	36 000,0
Річний випуск торфових пелет, т	15 840,0	15 840,0
Вартість товарної продукції без ПДВ, тис. грн.	25 080,0	25 080,0
Повна собівартість 1 т торфових пелет, грн.	1 361,02	1 305,15
Собівартість товарної продукції, тис. грн.	21 558,56	20 673,53
Валовий прибуток заводу, тис. грн.	3 521,44	4 406,47
Податок на прибуток (18%)	633,86	793,16
Чистий прибуток заводу, тис. грн.	2 887,58	3 613,31
Очікуваний річний економічний ефект, тис. грн.	-	793,53
Термін окупності додаткових капітальних інвестицій, років	-	0,69
Рентабельність витрат за чистим прибутком, %	13,39	17,48

Очікуваний річний економічний ефект, у порівнянні з базовим варіантом, становить 793,53 тис. грн. на рік. Термін окупності інвестицій складає 0,69 року.

Структури собівартості пелет в Україні зображена на рис. 7.1 [122]. Частка сировини від собівартості становить 58,3%. При використанні шихти з некондиційним високозольним торфом можливе зниження частки сировини в собівартості торфових пелет до 7%.

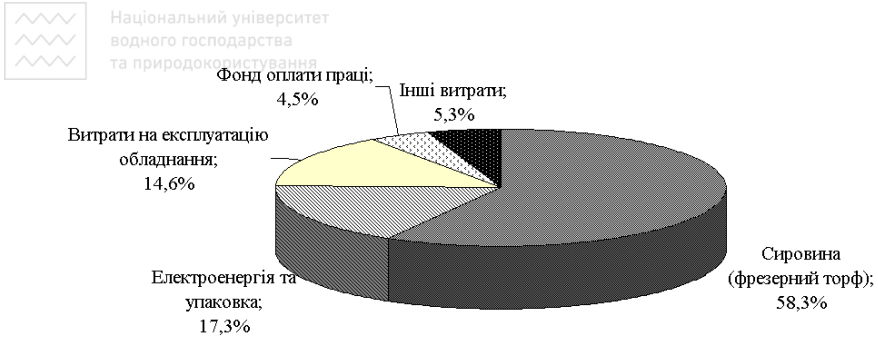


Рис. 7.1. Структура собівартості пелет в Україні

Отже, виготовлення пелет з некондиційного високозольного торфу з використанням технології його збагачення є економічно доцільним.



Национальний університет водного господарства та природокористування



8. ЕКОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОЗОЛЬНИХ ТОРФІВ

До позитивних екологічних аспектів використання високозольних торфів, які знижують вплив на навколишнє природне середовище, відносимо такі:

- збереження кондиційних запасів торфу;
- зниження загального балансу викидів парникових газів;
- комплексне використання усіх продуктів збагачення.

8.1. Збереження кондиційних запасів торфу

Пріоритетними для розробки є кондиційні запаси торфу, які сьогодні інтенсивно розробляються. При сучасній динаміці видобутку торфу розвідані кондиційні балансові запаси вичерпаються менше, ніж за 500 років. Проте в останні роки спостерігається тенденція збільшення річного видобутку торфу. Якщо ця тенденція не зміниться, то кондиційні балансові запаси вичерпаються уже за 2-3 століття. Динаміка зменшення частки кондиційних балансових запасів зображена на рис. 8.1.

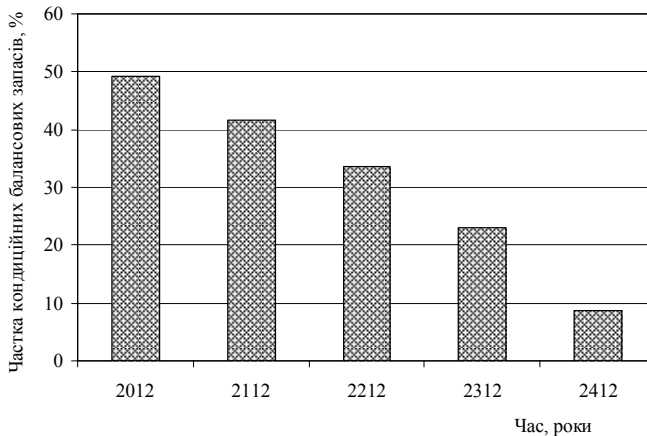


Рис. 8.1. Динаміка зменшення частки кондиційних балансових запасів



Залучення некондиційних високозольних торфів до використання у якості палива дасть змогу уникнути такого швидкого вичерпання кондиційних балансових запасів.

8.2. Зниження емісії парникових газів

У світовому балансі парникових газів торфові родовища розглядаються як природні акумулятори вуглецю, що зменшують вміст діоксиду вуглецю в атмосфері, так і джерела емісії парникових газів [123-127]. Вилучення CO_2 з атмосфери відбувається в процесі фотосинтезу органічної речовини рослин-торфоутворювачів в період їх вегетації. Накопичення і збереження вуглецю відбувається при торфоутворенні і торфонакопиченні. Саме органічна речовина торфу депонує сполуки вуглецю в умовах високої обводненості торфовища і при нестачі кисню.

На торфових родовищах, осушених під сільськогосподарські угіддя чи для видобування торфу, емісія парникових газів на порядок вища, ніж з родовищ, збережених у природному стані чи осушених і заліснених. Значення емісії парникових газів (CO_2 , CH_4 та N_2O) залежно від напрямку використання торфового родовища наведено в табл. 8.1 (від'ємні значення означають що газ не виділяється з родовища, а поглинається його рослинністю) [125].

Таблиця 8.1

Емісія парникових газів із торфових родовищ

№ з/п	Напрямок використання торфового родовища	Одиниці вимірювання	CO_2	CH_4	N_2O
1	2	3	4	5	6
1	Торфові родовища, збережені у природному стані	$\text{г/м}^2 \cdot \text{рік}$	-85,6	0,07	0,014
2	Торфові родовища осушені та заліснені	$\text{г/м}^2 \cdot \text{рік}$	-51,5	0,00	0,820



продовження табл. 8.1

1	2	3	4	5	6
3	Торфові родовища, осушені під с/г угіддя	г/м ² ·рік	1300-3100	-0,1-+0,1	1,1-1,8
4	Видобуток торффу	г/м ² ·рік	1060	6,7	0,1
5	Спалювання торффу	г/МДж	106	0,005	0,002

Процес акумуляції карбону на торфових родовищах, збережених у природному стані, відбувається за рахунок неповного біохімічного розкладу рослин торфоутворювачів. На торфових родовищах, збережених у природному стані, акумулюється від 10 до 50 г/м²·рік карбону, що відповідає емісії діоксиду вуглецю 36,7-183,5 г/м²·рік [125]. Значення акумуляції карбону залежить від віку торфового родовища і може бути визначене за формулою:

$$C = C_0 \cdot e^{-a \cdot t}, \text{ г/м}^2 \cdot \text{рік}, \quad (8.1)$$

де C_0 – початкова норма акумуляції карбону, г/м²·рік; a – коефіцієнт, рік⁻¹; t – вік торфового родовища, років [127].

Отже, продуктивність торфового родовища по акумуляції карбону знижується з віком у два – три рази.

Хоча збережені у природному стані торфові родовища є акумуляторами карбону, з їх поверхні відбувається емісія метану, яка значно зростає з віком, та є шкідливішою, за емісію діоксиду карбону [127]. Подібний «внесок» природоохоронних зон у посилення парникового ефекту не зовсім узгоджується з логікою їх існування [128]. І західними фахівцями, і авторами цієї монографії пропонується розробка старих торфових родовищ та їх повторне заболочення [129]. Ці заходи дозволяють знизити емісію еквіваленту CO₂ до 50% [124]. Таким чином, торфові родовища, збережені у природному стані, які мають значний вік (куди входять поклади високозольного торффу), виходячи з екологічних позицій, повинні розроблятися у першу чергу.

Потенційно зазоленими є також осушені торфові поклади. Вони повинні бути пріоритетними для розробки, оскільки становлять небезпеку для навколишнього природного середовища



не тільки через емісію парникових газів, але й як об'єкти підвищеної пожежної небезпеки.

8.3. Утилізація золи

У процесі виробництва торфових гранул та брикетів з високозольного торфу на кожен тону готової продукції утворюється 0,2–1 т золи. Її хімічний склад (табл. 8.2) та температурна активація при спалюванні торфу у межах 1000-1200° С надають частинкам золи в'язучі властивості. Це підтверджується дослідженнями авторів [130], де добавка до 20% золи торфу не знижує міцності бетону, а лише частково зменшує його густину. Оскільки хімічний склад золи низинних торфів (табл. 5.8) різних родовищ може коливатися, то кількість золи яку можна додавати до бетону без зниження його міцності, потрібно уточнювати додатково.

Таблиця 8.2
Хімічний склад золи високозольного торфу
низинного типу (у %)

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	Недопал
23,86-49,09	15,02-20,15	7,51-11,40	16,36-37,56	1,70-6,40	10-15

Отриману золу можна використовувати наступним чином: реалізовувати цементним заводам, підприємствам з виготовлення бетонів, фасувати цемент з додаванням золи торфу, організувати роздрібну торгівлю цементом з добавкою золи та виготовлення бетонів для власних потреб (ремонт будівель, гідропоруд).

Для ефективного залучення золи торфу у будівельних роботах на підприємствах з виробництва торфових гранул та брикетів потрібно організувати комплекси для її подрібнення, видалення сторонніх домішок, шихтування (при необхідності), упаковки.



ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Монографія є завершеною науковою роботою, в якій опубліковані результати досліджень високозольних торфів родовищ Рівненської та Волинської областей України на збагачуваність.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному.

На основі аналізу зазоленості торфових запасів України встановлено, що понад 52% з них не придатні для виробництва палива через понаднормативну зольність. Таким чином, залучення високозольних торфів до виготовлення палив, за умови розробки технології збагачення цих торфів, є перспективним резервом розширення сировинної бази брикетних та пелетних виробництв.

На основі аналізу властивостей мінералогічного складу золи та петрографічних складових високозольного торфу визначено, що в якості розділових ознак процесів збагачення торфу доцільно використовувати крупність частинок та їх густину. З урахуванням технологічних та економічних чинників виробництва торфових палив, ці процеси повинні бути «сухі».

Спираючись на теоретичний аналіз форм золи у торфі та їх зв'язків з органічною частиною, встановлено, що гранична зольність при збагаченні високозольного торфу дорівнює зольності відповідного нормальнозольного торфу. Ці значення для торфів родовищ «Старники» та «Засвіття-Ситнелюк» становлять 13,88% та 13,48% відповідно.

За результатами гранулометричного, фракційного та макроскопічного аналізів високозольного фрезерного торфу встановлено, що у процесі його подрібнення, за рахунок усадки органічної частини при сушінні, відбувається селективне розкриття мінералів вторинної золи, які концентруються у класах крупності 0,1-0,5 мм чи 0,1-1 мм, що відповідають їх розмірам. Зольність гранулометричних фракцій високозольних торфів експоненційно залежить від квадрату їх середньої крупності і має максимальне значення при середніх крупностях частинок від 0,22 мм до 0,48 мм. Достатнє розкриття мінералів наносної золи



високозольного торффу досягається при крупності подрібнення 3 мм.

Експериментально визначено, що методами пневматичної та вібраційної сепарації подрібненого високозольного торффу із зольністю 25,10-30,39% вдається отримати концентрат зольністю 20% та масовим виходом 26-70%. Встановлено, що середнє імовірнісне відхилення від крупності розділення при пневматичній сепарації вологого торффу обернено пропорційне коефіцієнту впливу вологості, який перебуває у лінійному зв'язку із вологістю торффу, крупністю розділення та їх добутком. Отримані залежності дозволяють обґрунтувати, що вологість торффу для ефективного розділення пневматичною сепарацією по крупності менше 1 мм не повинна перевищувати 30%.

На основі фракційного аналізу подрібненого до крупності –3 мм високозольного торффу визначені прогнознi значення показників збагачення за технологічною схемою, яка включає сушіння, подрібнення, знепилення, пневматичну сепарацію та вібраційну сепарацію легкої фракції, одержаної пневматичною сепарацією. Ця технологічна схема дозволяє отримано концентрати із зольністю 19,46% та 21,99% і вилученням горючої маси 93,51% та 79,32% з високозольних торфвів родовищ «Старники» зольністю 29,27% і «Засвіття-Ситнелюк» зольністю 28,04%.

За допомогою комп'ютерного моделювання процесу пневматичної сепарації торффу у криволінійному зигзагоподібному потоці отримана поліноміальна залежність третьої степені між параметрами сепараційних характеристик та коефіцієнтом варіації швидкості у робочому об'ємі сепаратора, яка дозволила обґрунтувати оптимальне значення цього коефіцієнта 0,3-0,4, що відповідає кроку пластин жалюзійного екрану сепаратора типу «Зиг-заг» 35-45 мм.

Розроблена технологічна схема виготовлення торфових гранул та брикетів, яка включає подрібнення до крупності 3 мм, знепилення по крупності 0,1 мм та пневматичну сепарацію із крупністю розділення 0,5-1,0 мм, при якій пил та важка фракція пневматичної сепарації є кондиційними продуктом і використовується для виготовлення продукції. Легка фракція пневматичної сепарації, яка містить 30% горючої маси, направляється на



спалювання до теплогенератора для підготовки сушильного агенту. Це дозволяє виготовляти кондиційні палива з високозольних торфів із зольністю до 29,27% та вилученням горючої маси торфу, з якого виготовляють паливну продукцію, 68,11-68,80%.

Річний економічний ефект від впровадження технології збагачення високозольного торфу на виробництві пелет продуктивністю 15,8 тис. т на рік становить 793,5 тис. грн. у цінах 2015 року. Розроблена технологія дозволяє додатково залучити до виробництва паливної продукції близько 0,3 млрд т некондиційних запасів торфу. Відходи від спалювання високозольного продукту у технології виробництва торфових гранул та брикетів придатні для утилізації у виробництві бетонів.





Додаток

Вибір та розрахунок обладнання для пневматичної сепарації високозольного торфу

Для сепарації високозольного торфу потрібно застосовувати пневматичні сепаратори типу «Зиг-заг» з жалюзійними екранами. Також можливе застосування пневматичних сепараторів типу «Зиг-заг» традиційної конструкції, каскадно-гравітаційних сепараторів з пересипними полицями або їх аналогів. Ці сепаратори випускаються фірмами: «Ламел 777» (Білорусія), «Урал-Омега», «Новые Технологии» (Росія) та «Joest» (Франція) [88; 90-92].

Обладнання для пневматичної сепарації розраховуємо з умови сталої масової концентрації продукту у пило-повітряній суміші. Для досягнення високої ефективності пневматичної сепарації рекомендується працювати при масовій концентрації продукту (кварцового піску) 2-3 кг/кг. Густина кварцу становить 2650 кг/м³. При цьому для інших матеріалів рекомендується зберігати сталою об'ємну концентрацію. Тобто необхідну концентрацію матеріалу для пневматичної сепарації подрібненого торфу визначимо зі співвідношення [54; 89]:

$$\frac{\rho_{кв.}}{\rho_{п.}} = \frac{\mu_{кв.}}{\mu_{п.}}, \quad (A1)$$

де $\rho_{кв.}$ та $\rho_{п.}$ – густина кварцу та пластику, відповідно, кг/м³; де $\mu_{кв.}$ та $\mu_{п.}$ – масова концентрація кварцу та пластику у потоці повітря, кг/кг.

Підставивши значення і перетворивши співвідношення отримаємо:

$$\rho_{п.} = \frac{1200 \cdot 2,5}{2650} = 1,13 \text{ кг/кг.}$$

Типова продуктивність технологічних ліній з виготовлення торфових гранул та брикетів становить 15, 30 та 60 тис. т на рік, або 2,1, 4,2 та 8,4 т/год. по висушеному та збагаченому торфу, який використовується безпосередньо для виготовлення паливної продукції. Вихід концентрату при зольності сировини 35% (яка є граничною виходячи з технологічних позицій) і, від-



повідно до графіка (рис. 6.6), становить 54%. Отже, максимальна продуктивність пневматичного сепаратора по живленню технологічної лінії продуктивністю 15 тис. т палива на рік знаходимо за формулою:

$$Q_{жк} = \frac{100 \cdot Q_k}{\gamma_k}, \text{ т/год.}, \quad (\text{A.2})$$

де Q_k – продуктивність пневматичного сепаратора по концентрату, т/год.; γ_k – масовий вихід концентрату в операції, %. Підставивши дані у формулу отримаємо:

$$Q_{жк} = \frac{100 \cdot 2,1}{54} = 3,89 \text{ т/год.}$$

Для продуктивності технологічних ліній 30 та 60 тис. т палива на рік будуть використовуватися два та чотири пневматичні сепаратори або комплекси пневматичних сепараторів, розрахованих для продуктивності 15 тис. т палива на рік.

Для забезпечення класифікації високозольного торфу по крупності від 0,5 до 1 мм (з метою виділення високозольного класу крупності у легку фракцію) потрібно забезпечити робочі швидкості потоків повітря від 3,2 до 5,5 м/с. Витрати повітря при максимальній та мінімальній швидкостях знаходимо за формулою:

$$L_n = \frac{1000 \cdot Q_{жк}}{\mu \cdot \rho_n}, \text{ м}^3/\text{год.}, \quad (\text{A.3})$$

де ρ_n – густина повітря, кг/м³ ($\rho_n=1,2$ кг/м³); μ – масова концентрація продукту у потоці газу, кг/кг. Підставивши значення у формулу отримаємо:

$$L_n = \frac{1000 \cdot 3,89}{1,13 \cdot 1,2} = 2868,7 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Мінімальну та максимальну площі робочого перерізу пневматичного сепаратора знайдемо за формулою:

$$S = \frac{L_n}{3600 \cdot v}, \text{ м}^2, \quad (\text{A.4})$$

де v – робоча швидкість (мінімальна та максимальна), м/с. Підставивши значення у формулу отримаємо:



$$S_{\max} = \frac{2868,7}{3600 \cdot 3,2} = 0,249 \text{ м}^2, \quad S_{\min} = \frac{2868,7}{3600 \cdot 5,5} = 0,145 \text{ м}^2.$$

Приймаємо площу робочого перерізу пневматичного сепаратора, як середнє значення між мінімальною та максимальною:

$$S = \frac{0,249 + 0,145}{2} = 0,197 \text{ м}^2.$$

Співвідношення сторін у пневматичних сепараторах типу «Зиг-заг» відомих виробників приймають 0,2-0,5, тобто:

$$b = (0,2..0,5)a, \text{ м.} \quad (\text{A.5})$$

Тоді значення сторони перерізу a знайдемо за формулою:

$$a = \sqrt{\frac{S}{0,2..0,5}}, \text{ м.} \quad (\text{A.6})$$

Підставивши значення отримаємо:

$$a = \sqrt{\frac{0,197}{0,5}} = 0,628 \text{ м,}$$
$$b = 0,5 \cdot 0,628 = 0,314 \text{ м.}$$

Приймаємо $a=0,65 \text{ м}$ $b=0,3 \text{ м}$, тоді уточнена площа робочого перерізу буде становити $S_{ym}=0,195 \text{ м}^2$. Уточнені значення мінімальної та максимальної витрат повітря на пневматичну сепарацію знайдемо за формулою:

$$L = 3600 \cdot S_{ym} \cdot v \cdot n, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (\text{A.7})$$

де n – кількість сепараторів. Підставивши значення отримаємо:

$$L_{\max} = 3600 \cdot 0,195 \cdot 5,5 \cdot 1 = 3861 \text{ м}^3/\text{год},$$

$$L_{\min} = 3600 \cdot 0,195 \cdot 3,2 \cdot 1 = 2246,4 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Вентилятор потрібно підбирати так, щоб забезпечити регулювання витрат повітря у розрахованому діапазоні.

Максимальну масову концентрацію продукту розрахуємо за формулою:

$$\mu_{\max} = \frac{1000 \cdot Q_{ж}}{L_{\min} \cdot \rho_n}, \text{ кг/кг.} \quad (\text{A.8})$$

Підставивши значення, отримаємо:

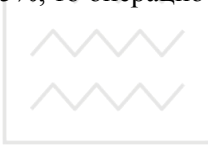


$$\mu_{\max} = \frac{1000 \cdot 3,89}{2246,4 \cdot 1,2} = 1,44 \text{ кг/кг.}$$

Таке збільшення концентрації продукту незначно вплине на ефективність сепарації.

За розрахованими геометричними та технологічними параметрами пневматичні сепаратори замовляють у виробників. Для технологічних ліній із продуктивністю 30 тис. т/рік потрібно приймати дві одиниці розрахованих сепараторів, а при продуктивності 60 тис. т/рік – чотири одиниці.

Для знепилення можна використовувати аналогічні апарати зменшеної висоти або інші класифікатори. При розрахунку сепараторів типу «Зиг-заг» для знепилення можна приймати удвічі більшу масову концентрацію, оскільки ця операція не потребує високої ефективності. Якщо за результатами досліджень гранулометричного складу вміст фракції 0-0,1 мм не перевищує 5%, то операцію знепилення проводити не потрібно.





СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз стану мінерально-сировинної бази України, облік родовищ і складання державних балансів запасів торфу і сапропелю станом на 01.01.2003–2005 років : звіт про НДР. Геоінформ України. К., 2005. 45 с.

2. Торфяные месторождения : монография / Тюремнов С. Н. ; под. общей ред. А.С. Оленина. Изд. 3-е, перераб. и доп. М. : Недра, 1976. 488 с.

3. Слюсар І.Т., Левковська Г.В. Сільськогосподарське використання осушених органогенних ґрунтів. Збірник наукових праць Національного наукового центру “Інститут землеробства УААН”. К. 2008. Вип. 1. С. 34–40.

4. Торф сырье в биотехнологии / Наумова Г.В. ; под ред. И.И. Лиштвана. Минск, 1987. 141 с.

5. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск : Наука и техника, 1975. 320 с.

6. Боднарюк Т.С. Використання торфу та торфових родовищ : навчальний посібник. Ч. 1. Рівне, 2007. 175 с.

7. ДСТУ 2042-92. Брикеты торфяные для коммунально-бытовых нужд. Технические условия. [Действует от 1993-01-01]. Изд. офиц. Киев : Госстандарт Украины. 4 с.

8. ДСТУ 2043-92. Торф фрезерный для производства брикетов. Технические условия. [Действует от 1993-01-01]. Изд. офиц. Киев : Госстандарт Украины. 3 с.

9. CEN/TS 14961. Solid Biofuels – Fuel Specification and Classes. April, 2005. p. 40.

10. Гнеушев В.О., Стадник О.С. Проблема зазеленості торфових родовищ України на прикладі Рівненської та Волинської областей. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування : зб. наук. праць. Рівне, 2010. № 1 (49). С. 188–194.

11. Стадник О.С., Гнеушев В.О. Використання торфових ресурсів України з урахуванням їх балансу у природі. Проблеми раціонального використання соціально-економічного та природно-ресурсного потенціалу регіону : фінансова політика та інве-



стиці : зб. наук. праць. Київ-Рівне, 2010. Вип. XVI № 4. – С. 480–488.

12. Горная энциклопедия : в 5 т. Под ред. Е.О. Козловского. Т. 5. М. : Советская энциклопедия, 1991. С. 170 – 174.

13. Гнеушев В.О. Торфова промисловість України. Донецький вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Т. 37. (Серія «Історія»). Донецьк : Український культурологічний центр, Східний видавничий дім, 2013. С. 173–178.

14. Земельний кодекс України. Редакція від 01.07. 2015. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2768-14> (дата звернення 17.02.2017).

15. Паливно-енергетичні ресурси України : статистичний збірник. Під кер. В.О. Піщейка. – К. : Державна служба статистики України, 2011. 316 с.

16. Способы добычи торфа / Агросайт. URL: <http://foragro.ru/sposoby-dobychi-torfa>. (дата звернення 17.02.2017).

17. Технология торфодобычи / ОАО «ТБЗ Усяж». URL: <http://usiazh.by/tehnologiya-torfodobychi/>. (дата звернення 17.02.2017).

18. Качественный верховой торф и удобрения на его основе от завода «Фарт». URL: <http://www.perm.aif.ru/economic/realty/1329283>. (дата звернення 17.02.2017).

19. Торф машины. URL: <http://peat-machine.at.ua/>. (дата звернення 17.02.2017).

20. Раковский В.Е., Пигулевская А.В. Химия и генезис торфа. М. : Недра, 1978. 231 с.

21. Терентьев А.А., Суворов В.И. Исследование структуры торфа. Минск : Наука и техника, 1980. 96 с.

22. Саранчук В.І., Ошовський В.В., Власов Г.О. Хімія і фізика горючих копалин. Донецьк : Східний видавничий дім, 2003. 204 с.

23. Staurus Kalaitzidis, Kimon Christanis. Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Holocene Peat of the Philippi Peatlands, Hellas: Preliminary Results. Sustaining Our Peatlands : 11th International Peat Congress. (Quebec City, 2000 y). Quebec City, Canada, 2000. P. 593–603.



24. Физика и химия торфа / И.И. Лиштван, Е.Т. Базин, Н.И. Гамаюнов, А.А. Терентьев. М. : Недра, 1989. 304 с.
25. Практическое руководство по организации добычи фрезерного торфа / В.И. Смирнов, А.Н. Васильев, А.Е. Афанасьев, А.Н. Болтушкин ; под ред. В.И. Смирнова. 1 изд. Тверь : ТГТУ, 2007. 392 с.
26. Maria Zevenhoven, Maria Zevenhoven, Mikko Hupa, Jaakko Lehtovaara, Stefan Storholm. Ash Forming Matter in Peat – the Role of Iron. Finnish-Swedish Flame Days 2009. (Naantali, Finland, January 28-29, 2009 y.). Naantali, Finland, 2009. – URL: http://www.ffrc.fi/FlameDays_2009/2B/ZevenhovenMPaper.pdf. (дата звернення 17.02.2017).
27. Физико-химические основы технологии торфяного производства / И.И. Лиштван, А.А. Терентьев, Е.Т. Базин, А.А. Головач. Минск : Наука и техника, 1983. 232 с.
28. Яцевич Ф.С. Торф сырье для химической переработки. Минск : АН БССР, 1981. 136 с.
29. Шарафутдинов Р.А., Гренадерова А.В., Ямских Г.Ю. Минералогический, макро- и микроэлементный состав торфяных отложений Юго-восточной части Красноярского края. Вестник Красноярского государственного университета: сборник научн. трудов. Красноярск, 2006. С. 51–57
30. Бетехтин А.Г. Курс минералогии. М.: КДУ, 2007. 721 с.
31. Голуб Е.С., Раковский В.Е. Разделение торфа на фракции различной плотности методом центрифужной сепарации. Химия и химическая технология : научно-техн. сборник. М, 1967. Вып. III (XVI). С. 103–107.
32. Берт Р.О. Технология гравитационного обогащения. Пер. с англ. Е.Д. Бачевой. М. : Недра, 1990. 574 с.
33. Стадник О.С., Гнеушев В.О. Технологічні властивості високозольного фрезерного торфу та обґрунтування методу його збагачення. Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2010. Вип. 25. С. 267–271.
34. Гнеушев В.О., Стадник О.С. Дослідження розподілу зольності по класах крупності високозольного фрезерного тор-



фу. Разработка рудных месторождений : научно-техн. сборник. Кривой Рог, 2011. Вып. 94. С. 276–281.

35. Смирнов В.О., Білецький В.С. Гравітаційні процеси збагачення корисних копалин. Донецьк : Східний видавничий дім, 2005. 300 с.

36. Аэродинамика измельченного торфа / Кислов Н.В. ; под ред. И.И. Лиштвана. Минск : Наука и техника, 1987. – 175 с.

37. Физические и аэродинамические свойства измельченного торфа / Кислов Н.В. ; под ред. Ф.А. Опейко. Минск : Вышэйшая школа, 1967. 147 с.

38. ГОСТ 11306 – 83. Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. [Действует от 1985-01-01]. Изд. офиц. Москва.: Государственный комитет стандартов Совета министров СССР, 1983. 6 с.

39. ГОСТ 11305 – 83. Торф. Методы определения влаги. [Действует от 1985-01-01]. Изд. офиц. Москва : Государственный комитет стандартов Совета министров СССР, 1983. 7 с.

40. ДСТУ ISO 1928:2006. Палива тверді мінеральні. Визначення найвищої теплоти згорання методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення найнижчої теплоти згорання (ISO 1928:1995, IDT). [Чинний від 2008-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2006. – 46 с.

41. ГОСТ 5396 – 77. Торф. Методы отбора проб. [Действует от 1979-01-01]. Изд. офиц. Москва : Государственный комитет стандартов Совета министров СССР, 1977. 12 с.

42. ГОСТ 11304 – 75. Торф. Метод приготовления сборных проб. [Действует от 1976-01-01]. Изд. офиц. М. : Государственный комитет стандартов Совета министров СССР, 1975. 5 с.

43. Афанасьев А.Е., Чураев Н.В. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства. М. : Недра, 1992. 288 с.

44. ДСТУ 4082–2002. Паливо тверде. Ситовий метод визначення гранулометричного складу. [Чинний від 2002-09-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2002. 24 с.

45. Кислов Н.В. Физико-механические свойства горных пород. Минск : БНТУ, 2007. 124 с.



46. Папушин Ю.В., Смирнов В.О., Білецький В.С. Дослідження корисних копалин на збагачуваність. Донецьк : Східний видавничий дім, 2006. 344 с.

47. ДСТУ 3550 97. Паливо тверде. Визначення та наведення показників фракційного аналізу. Загальні вимоги до апаратури та методики (ISO 7936 92). [Чинний від 1998-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1997. – 42 с.

48. Фоменко Т.Г., Бутовецкий Т.С., Погарцева Е.М. Исследование углей на обогатимость. М. : Недра, 1978. 262 с.

49. Гнеушев В.О. Стадник О.С., Боднарюк Т.С. Дослідження фракційного складу високозольного торфу. Сталій розвиток гірничо-металургійної промисловості : міжнар. наук.-техн. конф., (м. Кривий Ріг, 25–28 трав. 2011 р.). Кривий Ріг, 2011. С. 175.

50. Гнеушев В.О., Стадник О.С., Боднарюк Т.С. Оцінка збагачуваності високозольного торфу у важких рідинах. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування : зб. наук. праць. Рівне, 2011. Вип. 2(54). С. 172–178.

51. Гнеушев В.А., Стадник А.С. Украинский торф: некоторые проблемы и перспективы. Уголь Украины. К., 2011. № 11. С. 51–53.

52. Hnyeushev V., Stadnyk O. Use of Ukrainian Peat: Problems and Prospects in Energy and Horticulture. Peatlands international. Finland, 2011. №2/2011. Pp. 34–36.

53. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. М. : Недра, 1984. 208 с.

54. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. М. : Химия, 1989. 160 с.

55. Козин В.З. Исследование руд на обогатимость: учебное пособие. Екатеринбург : Издательство УГТУ, 2008. 312 с.

56. Кармазин В.И., Кармазин В.В. Физические основы обогащения полезных ископаемых. М. : ГИРЕДМЕТ, 1976. 251 с.



57. Остапенко П.Е. Технологическая оценка минерального сырья. Методы исследования : справочник. М. : Недра, 1990. – 264 с.

58. Бережний М.М., Мовчан В.П. Збагачення та окускування сировини. Кривий Ріг, 2000. 365 с.

59. Коткин А.М., Ямпольский Н.М., Геращенко К.Д. Оценка обогатимости угля и эффективности процессов обогащения. М. : Недра, 1982. 200 с.

60. Гнеушев В.А., Стадник А.С. Обогащение высокозольного фрезерного торфа низинного типа пневматической сепарацией. Инновационные аспекты добычи, переработки и применению торфа : междунар. конф., посвященная 115-летию НИТПУ. (г. Томск, 18–20 окт. 2011 г.). Томск, 2011. С. 175–179.

61. Гнеушев В.О., Стадник О.С. Збагачуваність високозольного торфу родовища «Старники» у вертикальному повітряному потоці. Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціала в сучасних умовах : Одиннадцата міжнарод. промисл. конф. (п. Плавья, Карпати, 10–14 февр. 2011 г.). п. Плавья, Карпати, 2011. С. 167–170.

62. Гнеушев В.А., Стадник А.С., Рыбак И.И. Обоснование технологической схемы обогащения высокозольного торфа Украины для производства гранул и брикетов. Процессы и средства добычи и переработки полезных ископаемых : междунар. научно-техн. конф., посвященная 80-летию со дня рождения заслуженного работника высшей школы Беларуси, д.т.н., проф. Кислова Н.В. (г. Минск, 17–20 апр. 2012 г.). Минск : БНТУ, 2012. С. 120–124.

63. Гнеушев В.О., Стадник О.С., Китовська К.О. Збагачуваність високозольного торфу на звужуючому вібраційному лотку. Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціала в сучасних умовах : Дванадцата міжнарод. промисл. конф. (п. Плавья, Карпати, 13–17 февр. 2012 г.). п. Плавья, Карпати, 2012. С. 242–244.

64. Анахин В.Д., Плисс Д.А., Монахов В.Н. Вибрационные сепараторы. М. : Недра, 1991. 157 с.



65. Верхотуров М.В. Сепарация влажных материалов. Красноярск : Издательство Красноярского университета, 1987. – 136 с.
66. Корінчук Д.М. Розробка композиційного палива на основі торфу і рослинної біомаси для використання в теплоенергетичних установках : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.14.06. Київ, 2010. 20 с.
67. Гнеушев В.О., Стадник О.С., Боблях С.Р. Вплив вологості високозольного торфу на ефективність пневматичної сепарації. Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2013. Вип. 34. С. 71–74.
68. Справочник по торфу. Под ред. А.В. Лазарева и С.С. Корчунова. М. : Недра, 1982. 760 с.
69. Кислов Н.В., Бакшанский В.И., Вакунов В.М. Основы пневмотранспорта сыпучих торфяных сред. Минск : Наука и техника, 1981. 182 с.
70. Зальцман А.М. Пневматическая сепарация торфа. Комплексное использование торфа : научно-техн. сборник. М., 1968. Вып. 2. С. 181–189.
71. Зальцман А.М. Характер разделения торфяных частиц при пневматической сепарации. Комплексное использование торфа : научно-техн. сборник. М., 1968. Вып. 2. С. 189–194.
72. Гнеушев В.О. Переробка торфу в паливні брикети : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2008. – 212 с.
73. Способ фракционирования торфа и устройство для фракционирования торфа: пат. 2270728 С2 Российская Федерация: МПК В07В 7/00, В07В 4/00, С10F 7/00. №2004113050/03; заявл. 27.04.2004 г.; опубл. 27.02.2006 г., Бюл. № 6. 4 с.
74. Method and apparatus for screening peat moss material: pat. 5429247 USA: IPC В07В 1/55. №807283 ; appl. Dec. 13, 1991 ; publish. July 4, 1994. 11 с.
75. Устройство для сепарации торфа: а.с. SU 1764718 А1 СССР: МКИ В07В 1/04. №4724185; заявл. 26.07.1989; опубл. 30.09. 1992, бюл. № 36. 3 с.
76. Способ фракционирования торфа: пат. 2024575 Российская Федерация: МПК В07В 1/04. №5037089/03; заявл. 13.04.92; опубл. 15.12. 94. 4 с.



77. Никифоров В.А. Разработка торфяных месторождений и механическая переработка торфа. 2 изд., перераб. и доп. Минск : Выш. школа, 1979. 400 с.

78. Гнеушев В.О. Брикетування торфу : монографія. Рівне : НУВГП, 2010. 167 с.

79. Шохин В.Н., Лопатин А.Г. Гравитационные методы обогащения : учебник для ВУЗов. М. : Недра, 1980. 400 с.

80. Смирнов В.О., Білецький В.С., Шолдра Р.О. Переробка корисних копалин. Донецьк : Східний видавничий дім, 2013. 600 с.

81. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Т. 1. Обогачительные процессы и аппараты : учебник для вузов. М. : Издательство Московского государственного горного университета, 2001. 472 с.

82. Техника и технология обогащения углей / В.В. Беловолов, Ю.Н. Бочков, М.В. Давыдов и др. ; под ред. В.А. Чантурия, А.Р. Молякко. Изд. третье, переработанное и дополненное. М. : Наука, 1995. 622 с.

83. Олюнин В.В. Переработка нерудных строительных материалов. М. : Недра, 1988. 232 с.

84. Верхотуров М.В. Гравитационные методы обогащения. М. : МАКС Пресс, 2006. – 352 с.

85. Справочник по обогащению руд : в 3 т. Под ред. Богданова О.С. Т. 1. М. : Недра, 1982. 367 с.

86. Щедринский М.Б., Волегов А.В. Обогащение асбестовых руд. М. : Гостгортехиздат, 1962. 234 с

87. Смышляев Г.К. Воздушная классификация в технологии переработки полезных ископаемых. М. : Недра, 1969. 102 с.

88. Сепарационное оборудование / НП ОДО «Ламел 777». URL: www.lamel777.ru. (дата звернення 17.02.2017).

89. Барский М.Д. Фракционирование порошков. М. : Недра, 1980. 327 с.

90. Классификаторы каскадно-гравитационные КГ / ЗАО «Урал-Омега». URL: <http://www.uralomega.ru/stuff/kg>. (дата звернення 17.02.2017).



91. Каскадно-гравитационные классификаторы Титан, КГК / ЗАО «Новые Технологии». URL: <http://new-technologies.spb.ru/classificator/kaskad/>. (дата звернення 17.02.2017).

92. Zig zag air separator / «Joest». URL: www.joest.com/download/W.001.EN.pdf. (дата звернення 17.02.2017).

93. Корчевський О.М. Пневмовібраційна сепарація лому кабельно-провідникової продукції : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.15.08. Дніпропетровськ, 2010. 22 с.

94. Бойко Д.Ю. Повышение эффективности пневматического обогащения углей на основе применения сепарации в горизонтальном воздушном потоке : автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук : 25.00.13. Москва, 2009. 20 с.

95. Кузьмин А.В. Повышение эффективности обогащения углей на основе применения вакуумно-пневматического способа сепарации : автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук : 25.00.13. Москва, 2008. 20 с.

96. Лебедев И.Ф. Исследование процессов разделения минералов различной плотности в воздушно-песчаном потоке и разработка новых аппаратов пневмосепарации : автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук : 25.00.13. М., 2008. 21 с.

97. Едильбаев А.И. Обогащение некондиционного техногенного марганецсодержащего сырья. М., 2009. 226 с.

98. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения / Тихонов О.Н., Андреев Е.Е., Кусков В.Б., Никитин М.В. СПб, 2004. 103 с.

99. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. Под ред. Э.Э. Лавендела. Т. 4. Вибрационные процессы и машины. М. : Машиностроение, 1981. 509 с.

100. Волинский В.Н. Технология древесных плит и композитных материалов : учебно-справочное пособие. СПб. : Издательство «Лань», 2010. 336 с.

101. Линёв Б.И., Дебердеев И.Х., Давыдов М.В. Современное состояние и основные направления развития техники и технологии глубокого обогащения угля. Горный журнал : научно-техн. сборник. М., 2007. № 2. С. 23–29.



102. Пилов П.И. Гравитационная сепарация полезных ископаемых. Днепропетровск : НГУ, 2003. 123 с.

103. Морозов В.В., Пестряк И.В., Адов В.А. Моделирование и оптимизация процесса пневматической сепарации в нелинейном потоке. Горный информационно-аналитический бюллетень : научно-техн. журнал. М., 2009. №14. С. 531–543.

104. Корчевский А.Н. Моделирование процесса сухой сепарации материалов. Настройка модели. Збагачення корисних копалин: наук. техн. збірник. Дніпропетровськ, 2005. № 23 (64). С. 113–119.

105. Корчевский А.Н. Влияние разрыхленности слоя материала на показатели пневматической сепарации лома цветных металлов. Збагачення корисних копалин: наук. техн. збірник. Дніпропетровськ, 2005. № 33 (74). С. 106–111.

106. Егоров О.А. Классификация сыпучих материалов в аппаратах с пересыпными полками и моделирование процесса : автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук : 05.17.08. СПб, 2000. 20 с.

107. Калинин С.М. Разработка методов расчета разделительной способности аэродинамических классификаторов порошков : автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.17.08. Иваново, 2000. 20 с.

108. Кирсанов В.А. Научные основы и принципы совершенствования процессов и аппаратов каскадной пневмоклассификации сыпучих материалов : автореф. дисс. на соискание уч. степени доктора. техн. наук : 05.17.08. Тамбов: ТГТУ, 2005. 34 с.

109. Титаренко В.В. Совершенствование процесса и оборудования каскадной пневмоклассификации дисперсных материалов : автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук : 05.17.08. Тамбов, 2005. 16 с.

110. Компас – 3D V13 : Руководство пользователя / ЗАО АСКОН, 2011. 2223 с. URL: http://sd7.ascon.ru/Public/Documents/Kompas/KOMPAS_V13/KOMPAS-3D_Guide.pdf. (дата звернення 17.02.2017).

111. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision 2.5.4 : Руководство пользователя / ООО «ТЕСИС». М. : ТЕСИС, 2008. 284 с.



112. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision 2.5.4: Примеры решения типовых задач / ООО «ТЕСИС». М. : ТЕСИС, 2008. 203 с.

113. Стадник О.С., Гнеушев В.О. Обґрунтування конструктивних параметрів пневматичного сепаратора типу «Зиг-заг» з жалюзійними екранами. Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. Кременчук., 2015. Вип. 2/2015 (91). С. 108–113.

114. Пневматичний сепаратор з жалюзійними екранами: пат. 97913 Україна: МПК В07В 4/00, В07В 7/00. № u201411559; заявл. 24.10 2014; опубл. 10.04.2015, бюл. № 7. 3 с.

115. Младецький І.К., Пілов П.І. Технологічні розрахунки показників збагачення корисних копалин : навчальний посібник. Дніпропетровськ : НГУ, 2005. 156 с.

116. Младецький І.К., Пілов П.І., Святошенко В.А. Анализ технологий сепарации полезных ископаемых с обратными связями. Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-техн. журнал. М., 2004. № 4. С. 331–333.

117. Справочник потребителя биотоплива / Виллу Варес, Юло Касък, Пеэтер Муйсте и др. Таллинн : Таллиннский технический университет, 2005. 183 с.

118. Гнеушев В.О., Стадник О.С. Обґрунтування технологічної схеми виробництва торфових гранул та брикетів з некондиційної сировини. Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. Кривий Ріг., 2012. Вип. 31. С. 252–255.

119. Stadnyk O., Hnyeushev V. Perspectives of use of a low moor peat with high ash content in the energy of Ukraine. Peatlands in Balance : 14th International Peat Congress. (Stockholm, June 3–8 2012 y.). Stockholm, Sweden, 2012. P. 142.

120. Гнеушев В.О. Стадник О.С., Рибак І.І. Технологія виробництва альтернативних палив із некондиційного високозольного торффу. Наука і бізнес – основа розвитку економіки : міжнар. наук.-практ. форум. (м. Дніпропетровськ 12–13 жовт. 2012 р.). Дніпропетровськ, 2012. С. 22–24.

121. Спосіб виготовлення торфовмісного палива з низькокондиційної сировини: пат. 78824 Україна: МПК С10F 7/00,



С10L 5/02. № u201201103; заявл. 03.02. 2012; опубл. 10.04. 2013, Бюл. № 7.

122. Стадник О.С. Шляхи зниження собівартості торфових гранул. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування : зб. наук. праць. Рівне, 2013. Вип. 3(63). С. 419–425.

123. Chimner R.A., Karberg J.M. Long-term carbon accumulation in two tropical mountain peatlands, Andes Mountains, Ecuador. *Mires and Peat*. 2008. Vol. 3. PP. 1–10.

124. Maria Strack. *Peatlands and Climate Change*. Jyvaskyla, Finland : IPS, 2008. 223 p.

125. Patrick Cril, Ken Hargreaves, Atte Korhola. *The Role of Peat in Finnish Greenhouse Gass Balances*. Ministry of Trade and Industry Finland. *Stadies and Reports* 10/2000. 3 p.

126. Технический кодекс установившейся практики ТПК 17.09-02-2011 (02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Климат. Выбросы и поглощение парниковых газов : Правила расчета выбросов и поглощения от естественных болотных экосистем, осушенных торфяных почв, выработанных и разрабатываемых торфяных месторождений. Минск, 2011 17 с.

127. Jukka Turunen, Kimmo Tolonen. *Rate of Carbon Accumulation in Boreal Peatlands and Climate Change*. *Global Peat Resources*. Joensuu : Department of Biology University of Joensuu, 1997. PP. 17–28.

128. Гнеушев В.А. Сопо Р. Торфяные месторождения и «тепличный эффект». *Уголь Украины*. К., 2001. № 2–3. С. 70–72.

129. Hnyeushev V. *About the Transformation of Peat into a Renewed Resource*. *Peatlands international*. Finland, 2004. №2/2004. Pp. 54–55.

130. Костров В.В., Свиридов А.В., Цибакин С.В., Дубровина Ю.Ю. Изучение химического состава и вопросов утилизации торфяной золы в производстве бетонов. *Химия и химическая технология : научно-техн. сборник*. Иваново, 2008. Т. 51, Вип. 11. С. 52–55.

131. Стадник А.С., Гнеушев В.А., Рыбак И.И. Влияние влажности високозольного торфа на эффективность пневматической сепарации. *Социально-экономические и экологические*



Національний університет
водного господарства
та природокористування

проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : 9 междунар. конф. (Минск-Тула-Донецк, 29–31 окт. 2013 г.). Минск-Тула-Донецк, 2013. Т. 2. С. 47–53.

132. Пристрій для вібросепарації подрібненого торфу: пат. 64397 Україна: МПК В03В 4/00, В07В 13/00, С10F 7/00. № u201103648; заявл. 28.03.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 21. 2 с.



Національний університет
водного господарства
та природокористування



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Наукове видання

*Стадник Олександр Святославович
Гнеушев Володимир Олександрович*

ЗБАГАЧУВАНІСТЬ ВИСОКОЗОЛЬНОГО ТОРФУ

Монографія

Друкується в авторській редакції

Технічний редактор

Г.Ф. Сімчук

Підписано до друку 18.12.2018 р. Формат 60×84¹/₁₆.
Ум.-друк. арк. 9,5. Обл.-вид. арк. 9,9.
Тираж 300 прим. Зам. № 5417.

*Видавець і виготовлювач
Національний університет
водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
державного реєстру видавців, виготівників і розповсю-
джувачів видавничої
продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*