МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

БАЮЛ КОСТЯНТИН ВАСИЛЬОВИЧ

УДК: 621.777.06: 622.788.32.004.17: 001.8

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ВАЛКОВИХ ПРЕСІВ З РОЗШИРЕНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МОЖЛИВОСТЯМИ ТА ЗБІЛЬШЕНИМ РЕСУРСОМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Спеціальність: 05.05.08 – «Машини для металургійного виробництва»

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеню
доктора технічних наук

Дніпро, 2021

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро

Науковий консультант:

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
МУРАВЙОВА Ірина Геннадіївна,
завідувач відділу технологічного обладнання та систем управління Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
ЗАСЕЛЬСЬКИЙ Володимир Йосипович,
завідувач кафедри інжинірингу з галузевого машинобудування Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій

доктор технічних наук, професор,
НАДУТИЙ Володимир Петрович,
завідувач відділу механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України

доктор технічних наук,
ЧУХЛІБ Віталій Леонідович,
завідувач кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Захист дисертації відбудеться «_09__» ____вересня____ 2021 _11-00_ годині на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 08.084.03 при Національній металургійній академії України за адресою: пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, 49600.
Факс: +38 (0562) 47-44-61. E-mail: lydmila_kamkina@ukr.net.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національної металургійної академії України (пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, 49600).

Автореферат розісланий «_____» серпня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
Вченої ради Д 08.084.03
доктор технічних наук, професор Л.В. Камкіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. В даний час все більшого розвитку набуває використання технологій брикетування дрібнофракційних сировинних матеріалів, що сприяє отриманню кондиційної сировини, утилізації відходів та вирішенню екологічних завдань. Валкові преси протягом багатьох років є одними з найбільш поширених машин у складі ліній брикетування сировини в металургійній, гірничодобувній, хімічній та інших галузях промисловості.

При виборі конструктивного виконання валкових пресів слід враховувати значну кількість факторів, таких, як фізико-механічні властивості матеріалів або їх сумішей; необхідну продуктивність; форму і розмір брикетів; можливість швидкої зміни формуючих елементів робочих поверхонь валків; зносостійкість валків; допустимі межі управління продуктивністю преса та ін. До теперішнього часу виконано значну кількість досліджень, в тому числі в Інституті чорної металургії НАН України, спрямованих на вивчення впливу властивостей шихтових матеріалів на енергосилові параметри процесу брикетування, створення технологій і пресового обладнання для брикетування дрібнофракційних металургійних відходів. В розвиток цього напрямку досліджень, заснованого під керівництвом академіка НАН України З.І. Некрасова, в різний час значний внесок зробили спеціалісти Інституту чорної металургії НАН України.

Серед сучасних іноземних спеціалістів, які займаються розробкою технологій та валкових пресів для брикетування, останніми роками найбільш відомими є: M. Hryniewicz, M. Bembenek, R.T. Dec, R.K. Komarek, A. Zavaliangos, Ю.Н. Логінов, Н.А. Бабайлов.

Аналіз літературних і відкритих інтернет-джерел показує, що в даний час відсутня науково обґрунтована структурована система, методологія або алгоритм покрокового проектування раціональної конструкції валкового преса з урахуванням технологічних особливостей процесу пресування. Більшість досліджень зосереджені на вирішенні конкретних завдань, наприклад, визначенні енергосилових параметрів брикетування, оптимізації конфігурації пресуючих поверхонь та ін. Але навіть при достатній коректності відомих методів прогнозування та аналізу процесів брикетування і роботи пресового обладнання порядок їх застосування та інтерпретація результатів досі чітко не визначені. При такому підході до проектування з невеликої кількості випробуваних, або знову розроблених конструкцій валкових пресів вибирається та, яка, на думку фахівця, є найбільш раціональною.

В даний час для розробки конструкції валкових пресів, як і більшості сучасних промислових машин та агрегатів, активно застосовуються системи автоматизованого проектування (САПР), наприклад, SolidWorks, Компас, Autodesk Inventor і т.п. При створенні валкового преса наявність стандартного набору засобів САПР є необхідною, але не достатньою умовою, тому що не дозволяє приймати науково обґрунтовані рішення щодо вибору раціональних конструктивних параметрів даних машин. Крім того, не до кінця досліджено взаємозв'язки між конструктивними та технологічними параметрами валкових пресів, що створює труднощі при

проектуванні валкових пресів з урахуванням вимог і особливостей реалізації конкретної технології брикетування.

Це робить актуальним необхідність вирішення питань аналізу та подальшого розвитку методів проектування валкових пресів.

В даний час в багатьох галузях промисловості, і особливо в машинобудуванні, активно застосовуються і знаходять розвиток методи структурно-параметричного синтезу та аналізу, а також агрегатно-модульний принцип створення обладнання.

У зв'язку з цим актуальними стають питання розвитку наукової бази для синтезу раціональних компонувальних і конструктивних рішень валкових пресів з урахуванням вимог щодо здійснення технологічного процесу пресування.

Вирішення зазначених завдань відкриває перспективи комплексного вирішення, в узагальненому вигляді, проблеми створення сучасного пресового обладнання для брикетування дрібнофракційної сировини для різних галузей промисловості.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В основу дисертації покладені результати наукових досліджень, що увійшли до звітів з науково-дослідних та госпдоговірних робіт Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України: «Розробка технічних рішень, що забезпечують регулювання та контроль технологічних режимів роботи валкових брикетних пресів». (№ держ. реєстрації 0108U001619); «Дослідження впливу зносу бандажів валкових пресів на технологічні та енергосилові параметри процесу брикетування» (№ держ. реєстрації 0110U002542); «Дослідження впливу конфігурації формуючих елементів та параметрів ущільнення на пружну післядію в брикетах» (№ держ. реєстрації 0115U001067); «Розвиток розрахунково-аналітичних методів визначення раціонального калібрування бандажів валкових пресів» (№ держ. реєстрації 0116U003144); а також результати досліджень, виконаних у межах Цільової програми наукових досліджень НАН України «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд» (Ресурс-2): Етап 1. «Розробка рекомендацій щодо вдосконалення конструкції валкових пресів з урахуванням технологічних режимів брикетування» (№ держ. реєстрації 0116U007037); Етап 2. «Розробка рішень по підвищенню технологічних можливостей та технічних і експлуатаційних характеристик пресу» (№ держ. реєстрації 0117U000673); Етап 3. «Розробка рекомендацій і технічної документації щодо виготовлення та подальшої експлуатації вдосконаленого валкового пресу конструкції ІЧМ» (№ держ. реєстрації 0118U004204); Етап 4. «Розробка системного підходу, рекомендацій та базових технічних рішень щодо створення валкового преса високого тиску для переробки широкого спектра дрібнофракційних сировинних матеріалів» (№ держ. реєстрації 0119U101397); Етап 5. «Розробка документації, рекомендацій і технічних рішень щодо виготовлення та подальшої експлуатації валкового преса високого тиску» (№ держ. реєстрації 0120U102656).

Мета і завдання дослідження полягає у вирішенні важливої науково-технічної проблеми зі створення сучасного пресового обладнання для брикетування дрібнофракційної сировини для різних галузей промисловості на базі наукового обґрунтування та розробки комплексу нових методів визначення раціональних параметрів конструктивних елементів валкових пресів, запроектованих за модульним принципом.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

- виконати аналіз та узагальнення факторів, що визначають знос бандажів валкових пресів в процесі їх експлуатації та розробити математичну модель зносу бандажів;
- розробити метод визначення та графічного відображення профілю робочих поверхонь валків преса на різних стадіях їх зносу;
- розробити метод дослідження впливу зносу валків на параметри процесу брикетування;
- розробити метод оцінки впливу конфігурації формуючих елементів валкового преса на пружну післядію в брикетах;
- встановити вплив швидкості деформації на параметри ущільнення дрібнофракційних шихт в осередку деформації валкового пресу;
- встановити зв’язки між конструктивними, технологічними та енергосиловими параметрами шнекового підпресовника валкового преса та розробити метод визначення його раціональних конструктивних параметрів;
- розробити комплексний метод вибору раціональної конфігурації формуючих елементів валкового преса з урахуванням зв'язку геометричних параметрів формуючих елементів з енергосиловими і технологічними характеристиками брикетування та показниками експлуатації бандажів;
- сформулювати основні положення та алгоритм синтезу конструкції валкового преса, який комплектується за модульним типом;
- розробити модернізовану конструкцію валкового преса, його окремих деталей та вузлів.

Об’єкт дослідження – процес створення валкових пресів з розширеними технологічними можливостями та збільшеним ресурсом експлуатації.

Предмет дослідження – взаємозв’язки між конструктивними параметрами пресового обладнання, зносом та ресурсом експлуатації валків, швидкістю пресування, попереднім ущільненням та пружною післядією в брикетах.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених завдань у роботі використано сучасні методи досліджень, у тому числі, математичне моделювання; при дослідженні впливу зносу пресуючих поверхонь валків на параметри процесу брикетування – основні методи теорії тертя та зношування; методи експериментальної механіки при досліджені процесів зношування валків та пружної післядії в брикетах; метод аналізу ієрархій використаний при дослідженні умов вибору раціональної конфігурації формуючих елементів; методи математичної статистики використані при обробці та аналізі результатів експериментальних та розрахунково-аналітичних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів. В дисертаційній роботі виконано комплекс теоретичних розробок та експериментальних досліджень, направлених на розвиток наукових основ створення високоефективного пресового обладнання для брикетування дрібнофракційної сировини з використанням сучасних методів проектування.

1. **Вперше встановлено взаємозв'язки та отримано аналітичні залежності величини зносу бандажів та технологічних параметрів процесу брикетування**. На основі отриманих залежностей розроблено новий метод прогнозної оцінки технологічних параметрів процесу брикетування при різному ступеню зносу

бандажів. Використання запропонованого методу дозволить підвищити ресурс експлуатації бандажів валкових пресів.

2. **Вперше встановлено взаємозв'язки між напруженнями в ущільнюваній шихті і пружною післядією з урахуванням конфігурації пресуючих поверхонь**. На основі отриманих залежностей розроблено експериментально-аналітичний метод та математичну модель визначення величини і оцінки впливу пружної післядії на якість брикетів. Використання методу дозволяє визначати раціональні геометричні параметри формуючих елементів та моделювати нові типи їх модифікації.
3. **Встановлені зв'язки геометричних параметрів формуючих елементів з технологічними параметрами процесу брикетування та показниками експлуатації бандажів валкових пресів.** На основі встановлених зв'язків з використанням трансформованого методу аналізу ієрархій розроблено комплексний метод визначення раціональної конфігурації формуючих елементів бандажів валкових пресів. Використання методу дозволяє обґрунтувати вибір раціональної конфігурації формуючих елементів з декількох можливих варіантів.
4. **Розвинені уявлення про вплив швидкості пресування шихти в осередку валкового преса на параметри процесу брикетування**. Встановлено закономірність зміни опору шихти стисканню, яка в загальному випадку описується рівнянням $p = k_n \cdot a \cdot Ky^b$, де k_n – поправочний коефіцієнт, що враховує вплив швидкості пресування. Отримані з урахуванням розрахованого поправочного коефіцієнту криві ущільнення, що є інтегральними відображеннями властивостей шихти, дозволяють для обраної швидкості пресування (частоти обертання валків) оцінити величину тиску, що розвивається в осередку деформації і, відповідно, максимально можливий коефіцієнт ущільнення.
5. **Отримали подальший розвиток теоретичні уявлення про взаємозв'язок конструктивних параметрів шнекового підпресовника з параметрами процесу брикетування у валковому пресі.** Запропоновано математичну модель визначення раціональних конструктивних і енергосилових параметрів шнекового підпресовника, яка враховує фізико-механічні властивості шихти, що брикетується, режими роботи валкового преса та дозволяє обґрунтувати умови застосування підпресовника.
6. **Вперше розроблено основні положення створення конструкцій валкових пресів на основі структурно-параметричного синтезу та аналізу.** Запропонована ієрархічна структура декомпозиції валкових пресів, яка заснована на класифікації їх компонувальних і конструктивних рішень за модульним принципом. Розроблено алгоритм структурно-параметричного синтезу і спосіб його реалізації до пошуку раціональної конструкції валкових пресів. Це відкриває перспективи подальшого розвитку сучасних методів проектування валкових брикетних пресів.

Практичне значення отриманих результатів. Результати роботи використані при розробці технологій і пресового обладнання для брикетування дрібнофракційних сировинних матеріалів, а саме:

- технічна документація та рекомендації щодо виготовлення вдосконалених конструкцій валкових пресів (ДП «Експериментально-виробниче підприємство Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України за участю підприємств-партнерів);
- технології брикетування карбіду кремнію та вдосконаленої конструкції валків преса (ТзОВ «П'ятихатський завод металургійних сумішей»);
- експериментально-промислового шнекового підпресовника валкового преса для брикетування вуглецевих енергетично цінних дрібнофракційних матеріалів (ТзОВ «Промбрикет»);
- рекомендацій щодо вдосконалення конструкції шнекового підпресовника та лінії приводу преса (ТзОВ «Біогумос»);
- технології виробництва ущільненого продукту з дрібнофракційних та пиловидних залізовмісних вторинних матеріалів (ПАТ «ММК Ілліча», ПАТ «Азовсталь»);
- розроблена конструкторська документація на виготовлення модернізованих модифікацій валкових пресів, яка передана до ДП «Експериментально-виробниче підприємство Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України».

Результати роботи можуть бути використані при розробці пресового обладнання та технологій для брикетування та компактування дрібнофракційних сировинних матеріалів в металургійній, гірничодобувній, хімічній та інших галузях промисловості.

Особистий внесок здобувача. Результати досліджень, виконаних в роботі, опубліковані в співавторстві зі співробітниками відділу технологічного обладнання та систем управління Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України; Department of Machine Systems, Faculty of Geoengineering, Mining and Geology, Wroclaw University of Science and Technology, Wroclaw, Poland; кафедри інформаційних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет». Особисто автору належать: аналіз досліджень та практичного досвіду створення сучасних валкових пресів [16,20,26,27,34,42,47]; узагальнення інформації про конструкцію та досвід експлуатації валків брикетних пресів [9,10,11,54], вдосконалення методів визначення параметрів процесу брикетування [1,13] розробка математичної моделі зносу бандажів [12,14,15], розробка методу дослідження впливу зносу бандажів на параметри процесу брикетування [17,18], розробка науково-технічних рішень щодо підвищення ресурсу експлуатації бандажів валкових брикетних пресів [37,43,44,55], розробка експериментально-аналітичного методу оцінки впливу конфігурації формуючих елементів на пружну післядію в брикетах [4,22,30,45], розробка методу та дослідження зв’язку конструктивних, енергосилових та технологічних параметрів шнекового підпресовника валкового преса [49,56], дослідження впливу швидкості пресування на основні параметри процесу брикетування [7], формулювання основних положень застосування структурно-параметричного синтезу і аналізу до пошуку раціональних конструкцій валкових пресів [2,3,25], розробка вдосконалених деталей та вузлів валкових пресів [29,31,39,40,53].

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи викладені у формі доповідей на 14 науково-практичних конференціях, у тому числі на: Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні ресурсозбережні матеріали та зміцнювальні технології», яка присвячена 20-річчю Кафедри «Матеріалознавство» (ПДТУ, Маріуполь, Україна, 2012); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Екологічні проблеми гірничо-металургійного комплексу України за умов

формування принципів збалансованого розвитку» (НГУ, Дніпропетровськ, Україна, 2008); Міжнародній науково-технічній конференції «Надійність металургійного обладнання». (НМетАУ, Дніпропетровськ, Україна, 2013); І Всеукраїнській науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (ДВНЗ УДХТУ, Дніпропетровськ, Україна, 2015); Всеукраїнській науково-технічній конференції, присвяченої 100-річчу з дня народження Г. Г. Єфименка «Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти». (НМетАУ, Дніпро, Україна, 2017); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Механіка машин – основна складова прикладної механіки» (НМетАУ, Дніпро, Україна, 2017); XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Литво. Металургія». (Запоріжжя, Україна, 2017); Міжнародній науково-технічній конференції «Матеріали, обладнання та ресурсозаощаджувальні технології» (Могильов, Білорусь, 2018); IV Всеукраїнській науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (ДВНЗ УДХТУ, Дніпропетровськ, Україна, 2018); «Physical & Chemical Geotechnologies, International Scientific & Practical Conference» (НГУ, Дніпро, Україна, 2018); X Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (ХПІ, Харків, Україна, 2018); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії», присвяченої 90-річчю заснування кафедри обробки металів тиском. (ХПІ, Харків, Україна, 2019); «Proceedings of the First Virtual Conference on Mechanical Fatigue» (VCMF 2020), (Portugal, Poland, 2020); VI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (ДВНЗ УДХТУ, Дніпро, Україна, 2020).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 56 робіт, у тому числі: 20 статей в спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ДАК України, 12 статей в науково-технічних, в тому числі іноземних виданнях, 16 тез та матеріалів доповідей на наукових конференціях, 2 патенти України, 5 статей, що увійшли до наукометричної бази даних Scopus та 1 стаття, що входить до бази Web of Science.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота має загальний обсяг 438 сторінки, з них: 324 сторінки основного тексту, додатків на 23 сторінках, 154 ілюстрації, 62 таблиці. Список використаних джерел складається з 214 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета і завдання дослідження, висвітлені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, апробація та публікація результатів дослідження, визначено особистий внесок автора.

У першому розділі виконано аналіз конструктивних і технологічних параметрів валкових пресів для переробки дрібнофракційних сировинних матеріалів. Запропоновано узагальнену класифікацію валкових пресів за технологічними та конструктивними параметрами. Встановлено, що найбільш поширеними на ринку

даного типу обладнання є преси з однією парою валків з симетричним та консольним розташуванням валків відносно підшипникових опор.

Для валкових пресів різних виробників досліджено взаємозв’язок конструктивних та технічних рішень з показниками їх ефективності. Встановлено, що компонувальне рішення валкових блоків суттєво впливає на конструкцію лінії приводу та відповідно на значення металоємності, енергоємності та ресурсу експлуатації.

Узагальнення інформації, присутньої у відкритих джерелах, вказує на те, що сучасні розробки щодо вдосконалення конструктивних та експлуатаційних параметрів валкових пресів здебільшого зосереджені на досліджені енергосилових параметрів процесу брикетування та впливу геометричних параметрів осередку деформації на параметри ущільнення шихти в брикети.

На базі аналізу літературних та інших джерел інформації встановлено, що основною проблемою, яка стримує розробку та впровадження сучасних валкових пресів з розширеними технологічними можливостями є відсутність чітко сформованого системного підходу, який дозволяє при створенні нових модифікацій валкових пресів компонувати їх за модульним принципом. Відсутні данні про теоретично розроблені методи аналізу таких показників процесу брикетування та стану пресового обладнання як: взаємозв’язок зносу пресуючих поверхонь валків з параметрами процесу брикетування; вплив швидкості пресування на якість брикетів і силові параметри процесу; взаємозв’язок властивостей шихти, конфігурації формуючих елементів та пружної післядії з якістю брикетів.

В результаті виконаного аналізу технічної інформації підтверджена актуальність досліджень по створенню сучасних валкових пресів, на підставі чого визначені цілі та задачі роботи.

У другому розділі виконані дослідження впливу зносу бандажів валкових пресів на технологічні та енергосилові параметри процесу пресування. Бандажі валкових пресів (рис. 1а) є водночас дорогими та швидкозношуваними деталями валкових пресів, стан та геометричні параметри робочих поверхонь яких суттєво впливають на режими роботи обладнання та якість брикетів (рис. 1б) Показано особливості зношування бандажів валкових пресів (рис. 1в), що відбувається в результаті багаторазового пружного і пластичного деформування одних і тих же мікрооб'ємів матеріалу робочої поверхні на контактах з твердими частинками шихти, що брикетується, яке викликає втомне руйнування поверхневого шару матеріалу бандажів.

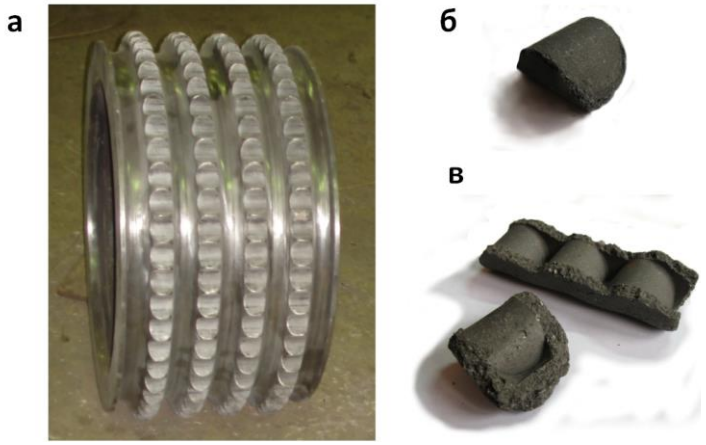

Рисунок 1 – Бандаж валкового преса, брикети
а – бандаж з зубчасто-жолобчастими формуючими елементами; б – брикет, отриманий на незношених бандажах; в – брикети, отримані на зношених бандажах

Розроблено концепцію оцінки впливу ступеня зносу бандажів на параметри брикетування, яка полягає у встановленні взаємозв'язків між контактними напруженнями на

робочих поверхнях бандажів, характером і величиною їх зносу, параметрами брикетування.

Розроблено новий розрахунково-аналітичний метод оцінки зносу бандажів валкових пресів на різних стадіях їх експлуатації, який включає математичну модель визначення та побудову топограм зносу (рис. 2).

Математична модель зносу бандажів валкових пресів характеризує взаємозв'язок лінійного зносу h майданчика пресуючої поверхні з контактними напруженнями в осередку деформації, властивостями матеріалу бандажів та умовами пресування шихти:

$$h = i_h \frac{p_n}{HB} \cdot \frac{\pi R \alpha_{pr}}{180^\circ} n_p, \qquad (1)$$

де i_h – питома інтенсивність зношування; p_n – нормальна складова контактних напружень, МПа; HB – твердість матеріалу бандажів по Брінеллю, МПа; R – радіус, що визначає положення точки контуру робочої поверхні бандажа відносно осі валка, мм; α_{pr} – кут пресування, град; n_p – кількість обертів валка.

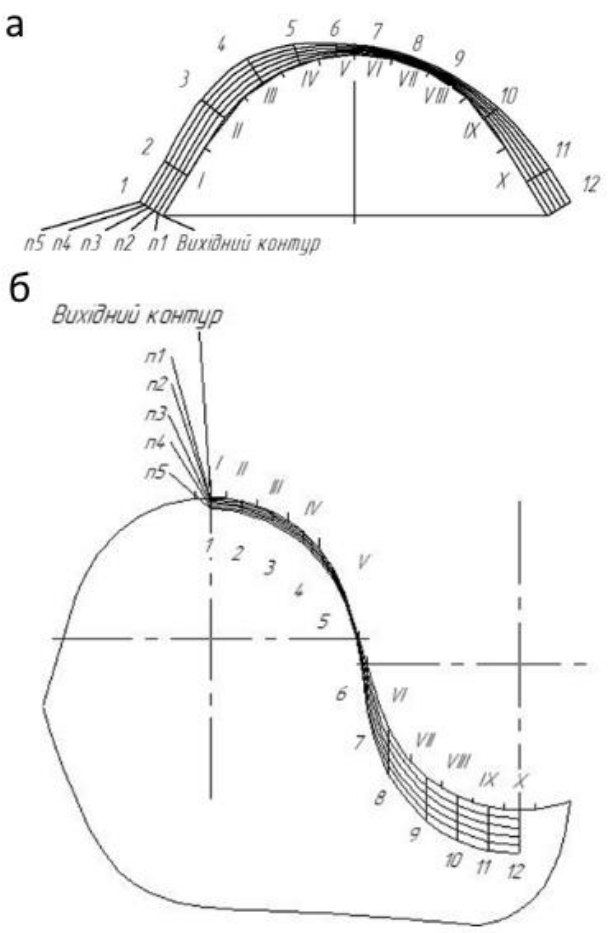

Рисунок 2 – Топограма зносу робочої поверхні формуючого елемента валкового преса
а – в поперечному перетині; б – в поздовжньому перетині

Зазначений розрахунково-аналітичний апарат відкриває можливість розробки раціональних режимів брикетування і експлуатації преса на різних стадіях зносу бандажів і створення ефективних методів відновлення робочих поверхонь валків з метою збільшення терміну експлуатації бандажів преса.

Встановлено взаємозв'язки і отримані графічні й аналітичні залежності між величиною зносу бандажів, технологічними і енергосиловими параметрами брикетування. На підставі встановлених залежностей між зносом бандажів і параметрами брикетування створений новий метод прогнозної оцінки технологічних і енергосилових параметрів брикетування при різному ступеню зносу бандажів за допомогою номограм (рис. 3).

Розроблена експлуатаційна карта (ЕК) комплекту бандажів валкового брикетного преса. Надалі застосування такої карти дозволить накопичити фактичні дані про режими і умови експлуатації бандажів різного конструктивного виконання в умовах брикетування шихт з різними фізико-механічними властивостями. Зіставлення фактичних параметрів експлуатації бандажів з розрахунковими даними дозволить вносити корективи в моделі та методи оцінки впливу зносу бандажів на процес

брикетування, тим самим підвищити їх ефективність. Дані, отримані за допомогою ЕК, також будуть застосовані при розробці системи планово-попереджувальних ремонтів пресового обладнання.

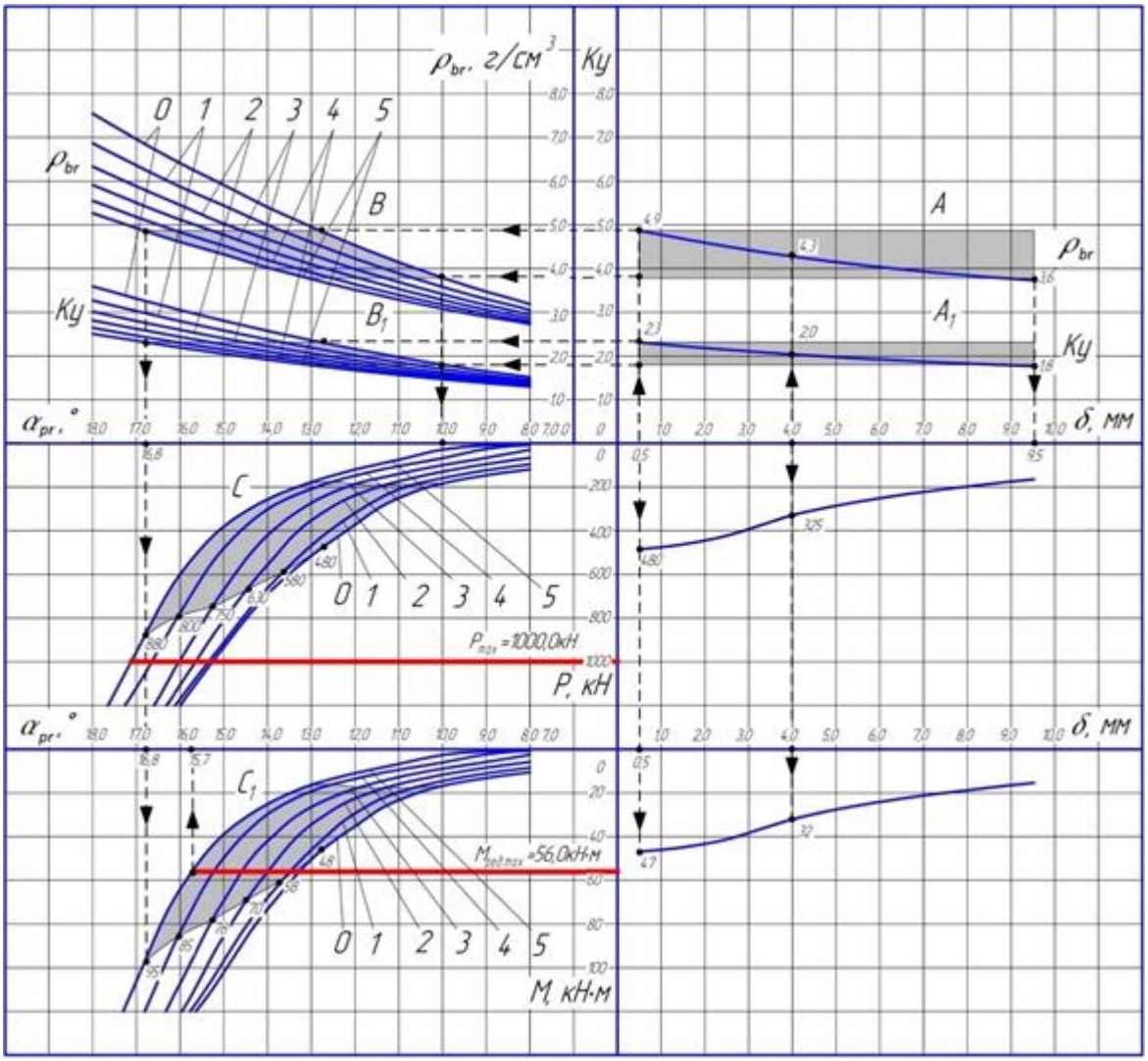

Рисунок 3 – Номограма параметрів процесу брикетування для різного ступеня зносу бандажів; конфігурація формуючих елементів – зубчато-жолобчаста F2; шихта – 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

У третьому розділі запропоновано концепцію дослідження впливу зміни формуючих елементів валкових пресів на пружне розширення брикетів, яка полягає у встановленні зв'язку напружено-деформованого стану ущільнюваної шихти з величиною і розподілом пружної післядії.

Виконано комплекс експериментальних і аналітичних досліджень, спрямованих на створення науково-методичної бази для оцінки впливу конструктивних параметрів формуючих елементів валкових пресів на пружну післядію і якість брикетів.

Експериментально встановлено і аналітично описані залежності коефіцієнта ущільнення, пружної післядії, щільності та розущільнення від тиску пресування (рис. 4).

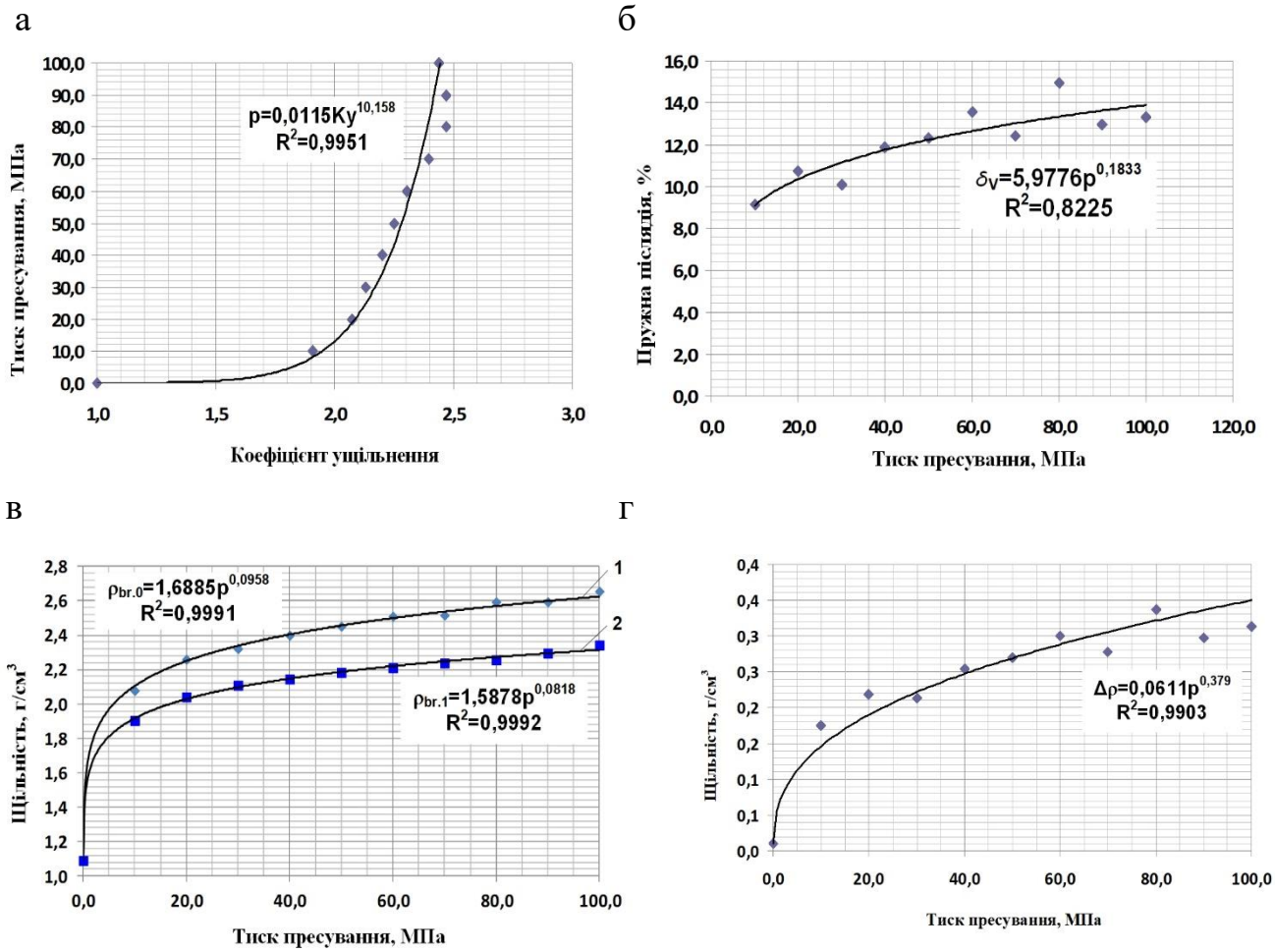

Рисунок 4 – Залежності параметрів брикетування дрібнофракційного матеріалу (матеріал – марганцевий концентрат)
а – коефіцієнт ущільнення-тиск пресування; б – тиск пресування-пружна післядія;
в – тик пресування-щільність брикетів; г – тиск пресування-розущільнення брикетів
1 – для шихти під тиском; 2 – з урахуванням пружної післядії

Створено експериментально-аналітичний метод оцінки впливу конфігурації формуючих елементів на пружне розширення брикетів, заснований на використанні полів напружень, що включає побудову епюр розподілу напружень, пружної післядії і щільності після пружного розширення (рис. 5). Створено алгоритм застосування запропонованого методу.

Показана можливість застосування створеного методу до вирішення наступних завдань: прогнозування і оцінки впливу зміни формуючих елементів і параметрів ущільнення на пружну післядію; визначення раціональних геометричних параметрів формуючих елементів, які забезпечують отримання брикетів із заданою щільністю з урахуванням їх пружного розширення після зняття навантаження; моделювання нових типорозмірів формуючих елементів для зниження негативного впливу нерівномірності розподілу ущільнення в брикеті.

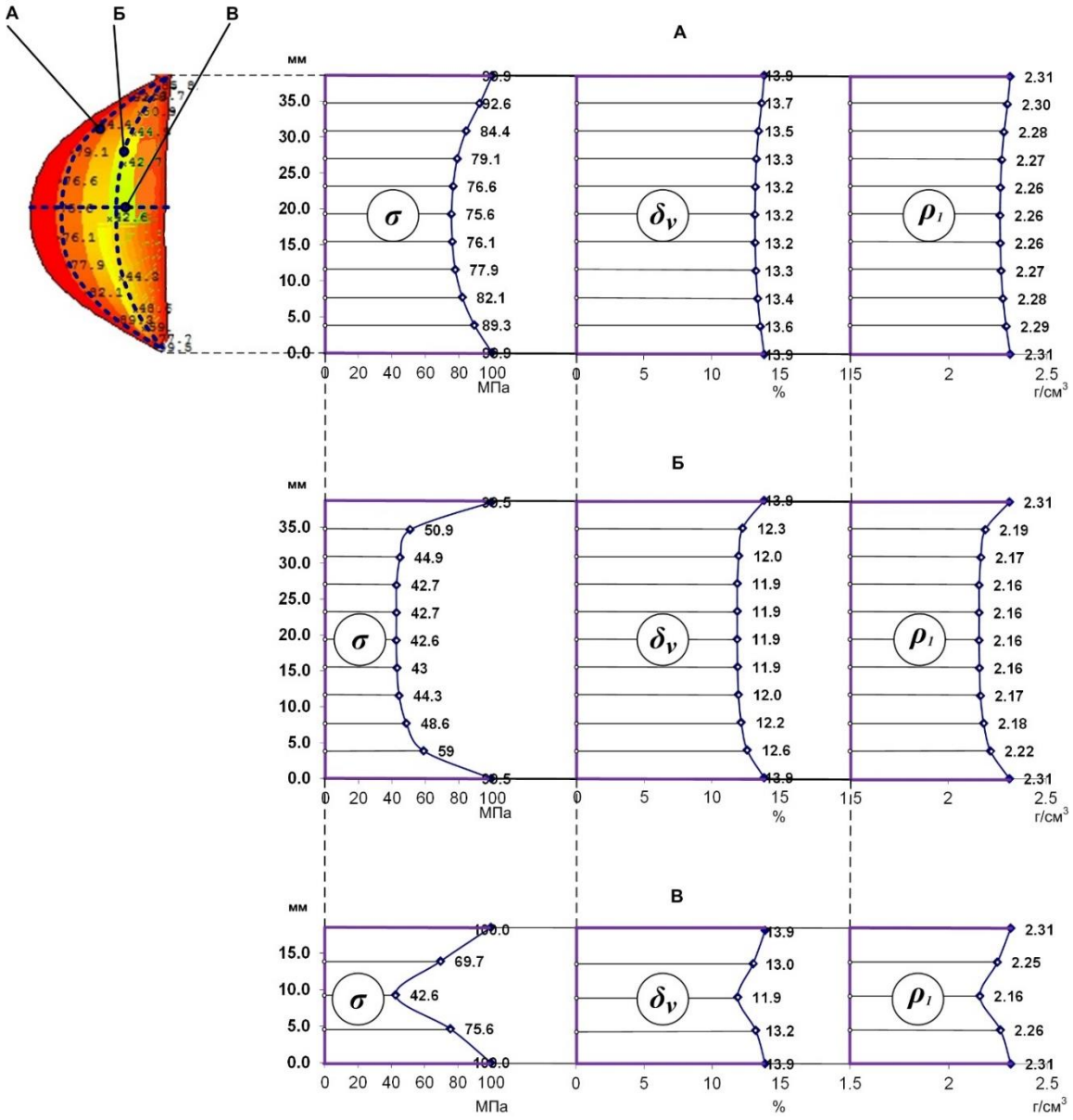

Рисунок 5 – Розподіл в брикеті напружень (σ), пружної післядії (δ_v) та щільності (ρ_1), конфігурація формуючих елементів зубчасто-жолобчаста, матеріал – марганцевий концентрат (фр. -3 мм)

Встановлено, що, змінюючи розміри і геометричні співвідношення формуючих елементів, можливо впливати на розподіл характеристик ущільнення і пружної післядії. На базі порівняльного аналізу епюр розподілу пружної післядії та щільності в брикетах розроблений новий формуючий елемент (рис. 6) розміри якого визначені співвідношеннями: L =0,8 …1,2 B; H = B/ 2,3…2,6; h1 = h2 = B/2,3…2,6; r1 = 0,1 …1,3 H; r2 = r3 = 0,1 …1,3 H; γ1=30…70°; γ2 = 30…70°; δ=0,5…3 мм, де L – довжина основи комірки; B – довжина основи кільцевого жолобу; H – глибина комірки; h1, h2 – глибина кільцевих жолобів; r1– радіус закруглення бокових сторін з меншою основою комірки; r2, r3 – радіуси закруглення бокових сторін з меншою основою жолобів; $\gamma 1$– кут розкриття комірки; $\gamma 2$ – кут розкриття кільцевих жолобів; δ – зазор між робочими поверхнями валків, при цьому профілі робочих поверхонь валків виконані таким

чином, щоб при їх сполученні в процесі роботи преса забезпечувалося гарантоване перекриття δ_0=0,5 мм формуючих елементів.

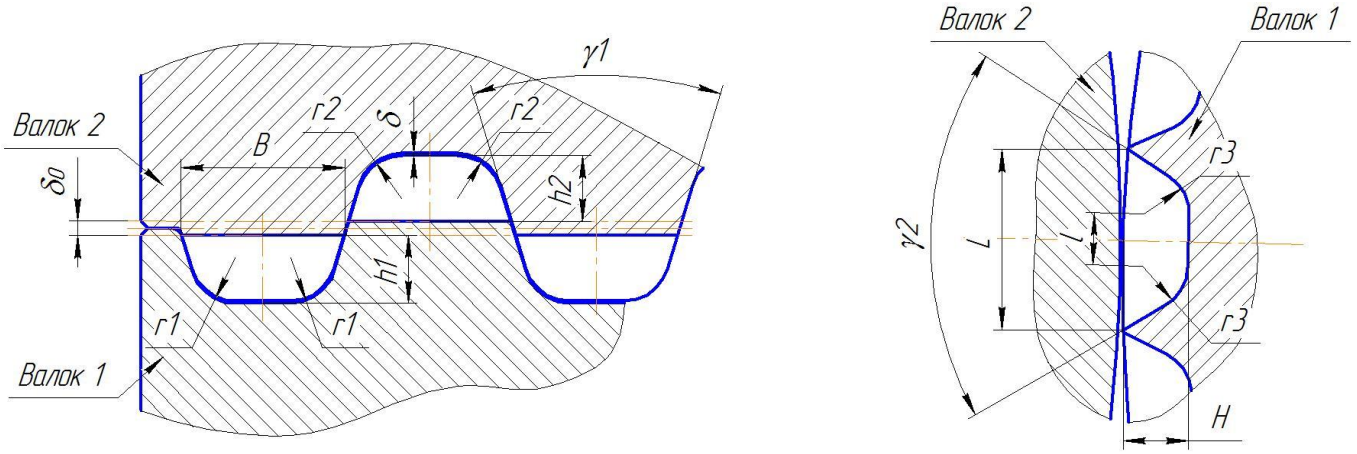

Рисунок 6 – Новий тип формуючих елементів

У четвертому розділі виконано теоретичні дослідження впливу швидкості пресування на параметри ущільнення дрібнофракційних шихт в валковому пресі.

Проведений аналіз рівнянь, які описують вплив швидкості деформації на параметри ущільнення металевих порошків в гладких валках. Визначено, що найбільш точними є аналітичні вирази, запропоновані О.А. Катрусом:

$$V_{kr} = \frac{12{,}5 \cdot g \cdot K \cdot R \cdot \rho_{bulk} \cdot \left(\mathrm{Sin}\,\alpha_{щ} - \mathrm{Sin}\,\alpha_{pr}\right)}{\mu \cdot a_c},\ V_{\max} = (1{,}5...10) \cdot V_{кр}\,, \qquad (2)$$

де $V_{кр}$ – верхня критична швидкість пресування; K – коефіцієнт проникності матеріалу; R – радіус валків; ρ_{bulk} – насипна щільність шихти; $\alpha_{щ}$ – кут подачі матеріалу; $\alpha_{пр}$ – кут пресування; μ – коефіцієнт в'язкості повітря; a_c – товщина шару матеріалу в напрямку найменшого спротиву фільтрації; V_{max} – максимальна швидкість пресування.

На базі виразів (2) сформована математична модель, яка описує вплив частоти обертання валків брикетного преса на коефіцієнт ущільнення в осередку деформації:

$$Ky = Kc\frac{Ar^{0{,}68} \cdot \nu_r}{20 \cdot \pi \cdot d_{част} \cdot R \cdot n} + 1\ , \qquad (3)$$

де Ky – коефіцієнт ущільнення; Kc – коефіцієнт стиснення потоку; Ar – критерій Архимеда; ν_r = 1,63801×10^6 м^2/с – кінематична в'язкість повітря; $d_{част}$ – середній діаметр частинок матеріалу; n – частота обертання валків.

Значення критерію Архімеда визначається виразом:

$$Ar = \frac{g \cdot d_{част}}{\nu_r^2} \cdot \frac{(\rho_T - \rho_Г)}{\rho_Г}, \qquad (4)$$

Рисунок 7 – Залежність коефіцієнта ущільнення від частоти обертання валків преса для шихти 90% коксового дріб'язку і 10% ЛСТ

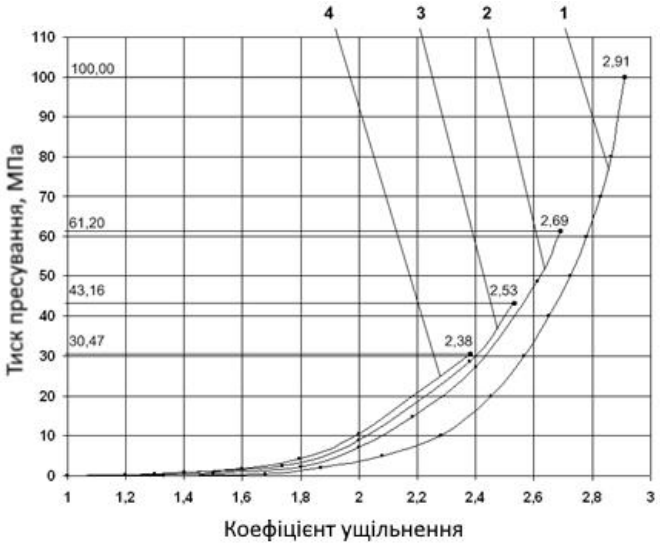

Рисунок 8 – Залежність коефіцієнта ущільнення від тиску пресування для шихти з 90% коксового дріб'язку і 10% ЛСТ при частоті обертання валків:
1 – 1 хв$^{-1}$; 2 – 8 хв$^{-1}$; 3 – 10 хв$^{-1}$; 4 – 12 хв$^{-1}$

де $g = 980 см/с^2$; $\rho_г$= 1,105 кг/м^3 – щільність середовища (повітря); $\rho_т$– щільність частинок матеріалу, що брикетується.

В інтервалі частот обертання валків нижче n_{kr}, яка відповідає критичній швидкості пресування, щільність брикетів не знижується. Прийнято допущення, що, починаючи з n_{kr}, зі збільшенням частоти обертання валків відбувається монотонне зниження величини ущільнення. Дане явище спостерігається аж до моменту, коли частота обертання валків досягає значення $n_{\max}$, відповідного $V_{\max}$, при якому величина K_y наближається до одиниці.

Беручи до уваги зазначені допущення, з використанням формул (2-4) отримані розрахункові графічні залежності, що характеризують вплив швидкості пресування на параметри ущільнення шихти (рис. 7).

З рис. 7 видно, що для прийнятих параметрів осередку деформації при кожному значенні частоти обертання валків досягається певне значення коефіцієнта ущільнення шихти. Якщо врахувати, що шихта, яка знаходиться в міжвалковому просторі, не витісняється із зони пресування, та її первинний об'єм повністю ущільнюється до об'єму брикету на лінії центрів валків, то формування брикету для кожного конкретно взятого значення частоти обертання валків можна описати кривою ущільнення в координатах «тиск пресування-коефіцієнт ущільнення». Ущільнення шихти в діапазоні частот обертання валків до n_{kr} в загальному вигляді описується рівнянням:

$$p = a \cdot Ky^b. \qquad (5)$$

Зменшення значень p зі збільшенням частоти обертання валків обумовлено процесами фільтрації повітря, внаслідок чого зменшується опір шихти стиску. Щоб врахувати це явище, в рівняння (5) вводиться поправочний коефіцієнт k_n:

$$p = k_n \cdot a \cdot Ky^b . \qquad (6)$$

Величина коефіцієнту k_n визначається, як відношення значення коефіцієнта ущільнення при швидкості пресування менше V_{kr} до значення коефіцієнта ущільнення, відповідного вибраній частоті обертання валків. Таким чином, для досліджуваних матеріалів, з використанням рівнянь (2-6) та графічних залежностей по типу, наведеному на рис. 8, побудовані графічні залежності, які описують вплив швидкості деформації на опір шихти стисканню з врахуванням фізико-механічних властивостей шихти та геометричних параметрів осередку деформації (рис.8). Дані на рис. 8 вказують на те, що зі збільшенням швидкості пресування опір шихти стиску зменшується, в результаті змінюється напружено-деформований стан в осередку деформації. Тому, кожна з кривих ущільнення, представлених на рис. 8, обмежена відповідним значенням коефіцієнта ущільнення.

Отримані в даному розділі роботи результати є базою для подальшого розвитку методів прогнозування та оцінки впливу швидкості деформації на енергосилові та технологічні параметри брикетування дрібнофракційних шихт в валкових пресах.

У п'ятому розділі виконано дослідження зв'язків конструктивних, енергосилових і технологічних параметрів шнекового підпресовника валкового преса (рис. 9).

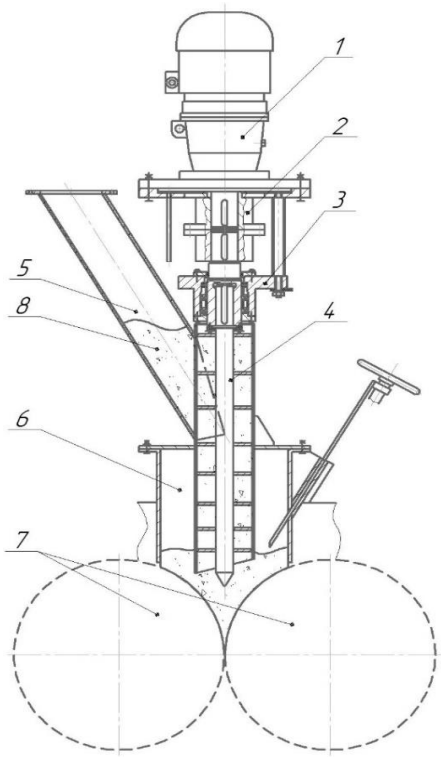

Рисунок 9 – Загальний вигляд шнекового підпресовника валкового преса: 1 – мотор-редуктор; 2 – муфта; 3 – опорно-підшипниковий вузол підпресовника; 4 – шнек; 5 – завантажувальна ділянка підпресовника; 6 – завантажувальний пристрій валкового преса; 7 – валки преса

Необхідність використання підпресовника виникає при вирішенні задач отримання брикетів з матеріалів з низькою насипною щільністю (0,6≤ г/см^3), що вимагають примусової подачі у міжвалковий простір. Для отримання готових брикетів коефіцієнт ущільнення таких матеріалів повинен бути рівний, або перевищувати 3,0 од.

Запропоновані умови використання шнекового підпресовника:

гравітаційна подача

$$Ky_{roll.\max} \geq Ky_{br.\max}, \qquad (7)$$

підпресовник шнекового типу

$$Ky_{roll.\max} \leq Ky_{br.\max}, \qquad (8)$$

де $Ky_{br.\max} = \rho_{picn} / \rho_{bulk}$ – максимально можлива теоретична величина ущільнення матеріалу, що брикетується; $Ky_{roll.\max}$ – максимально можливий коефіцієнт ущільнення шихти у міжвалковому просторі, ρ_{picn} – пікнометрична щільність частинок ущільнюваної шихти.

Для опису поведінки матеріалу в шнековому підпресовнику запропоновано використовувати експоненціальну функцію зв'язку тиску пресування p з коефіцієнтом ущільнення у вигляді:

$$p = a \cdot e^{(c \cdot Ky)} + b, \qquad (9)$$

де a, b і c – коефіцієнти в рівнянні апроксимації кривої пресування дрібнофракційних шихти.

Для забезпечення стабільності процесу брикетування в валковому пресі з використанням шнекового подпресовника важливе дотримання умови сталості масової витрати шихти, що брикетується, тобто відповідність продуктивності валків преса Q_{pr} і підпресовника Q_{scr}:

$$Q_{pr} = Q_{scr}. \tag{10}$$

Продуктивність шнекового підпресовника:

$$Q_{pr} = Q_{scr} = k_Q \cdot Q_{scr.req}, \tag{11}$$

де $Q_{scr.req}$ – необхідна продуктивність шнекового підпресовника; k_Q – коефіцієнт запасу продуктивності;

$$Q_{scr.req} = \frac{\pi \cdot (D_{scr}^2 - d_{scr}^2) \cdot (S_{scr} - S_0) \cdot \eta_3 \cdot 60 \cdot n_{scr} \cdot \psi \cdot \rho_{bulk}}{4 \cdot 10^9}, \tag{12}$$

де D_{scr} – зовнішній діаметр шнека; d_{scr} – внутрішній діаметр шнека; S_{scr} – крок гвинтової лінії шнека; S_0 – товщина стрічки шнека в напрямку осі; η_3 – коефіцієнт, що враховує просування шихти вздовж осі в залежності від кута нахилу гвинтової лінії шнека; n_{scr} – частота обертання шнека; $\psi \le 1$ – коефіцієнт заповнення витків шнека.

Тиск в шихті після виходу з шнека p_{scr} на ділянці захоплення матеріалу валками преса уявляє собою тиск попереднього ущільнення шихти p_{pc} і визначається відповідно до виразу:

$$p_{scr} = p_{pc} = p_0 \cdot e^{-\frac{[b_{scr} \cdot f_c \cdot \cos\omega - (b_{scr} + 2 \cdot h_{scr} + b_{scr} \cdot f_c \cdot \sin\omega) \cdot f_s]}{b_{scr} \cdot h_{scr} \cdot \sin\alpha_e} \cdot l_{scr}}, \tag{13}$$

де b_{scr} – ширина витка шнека; p_0 – початковий тиск в шихті на ділянці входу до шнека підпресовника; f_s – динамічний коефіцієнт тертя шихти о стрічку шнека; f_c – динамічний коефіцієнт тертя шихти о корпус шнека; α_e – кут нахилу гвинтової лінії шнека на ефективному діаметрі; h_{scr} – висота витка шнека; l_{scr} довжина шнека.

Коефіцієнт ущільнення шихти в валковому пресі з використанням шнекового підпресовника може бути визначений, як:

$$Ky_{br} = Ky_{pc} \cdot Ky_{roll}, \tag{14}$$

де Ky_{pc} – коефіцієнт попереднього ущільнення шихти після виходу з підпресовника на вході в зону захоплення матеріалу валками; Ky_{roll} – коефіцієнт ущільнення шихти валками преса, який визначається геометричними параметрами осередку деформації валкового преса.
Величина попереднього ущільнення:

$$Ky_{pc} = \frac{1}{c} \cdot \log\left(a / (p_{pc} - b)\right). \tag{15}$$

Щільність брикетів з урахуванням пружної післядії:

$$\rho_{br.1} = \frac{Ky_{br} \cdot \rho_{bulk}}{\frac{\delta_V}{100} + 1}, \tag{16}$$

де δ_V – пружна післядія.

Для оцінки ефективності принятої конструкції шнека запропоновані наступні умови:

$$p_{\max} \ge 10 \cdot p_{pc};\ l_{scr} \le 5 \cdot S_{scr} \tag{17}$$

Якщо умови (17) не виконуються, необхідно виконати оцінку і аналіз відхилення і провести коригування параметрів α_e та l_{scr}. В разі, коли вказані умови виконані, то визначаються енергосилові параметри підпресовника.

Осьове зусилля на шнеку:

$$F_{axis} = \frac{\pi \cdot (D_{scr}^2 - d_{scr}^2)}{4} \cdot p_{pc}. \quad (18)$$

Сила тертя в підпресовнику:

$$F_f = \frac{\pi \cdot (D_{scr}^2 - d_{scr}^2)}{4} \cdot \frac{l_{scr}}{S_{scr}} \cdot \frac{p_{pc} + p_0}{2} \cdot f_c. \quad (19)$$

Момент на валу шнека:

$$M_{scr} = (F_{axis} \cdot tg\alpha_e + F_f) \cdot \frac{D_{scr} + d_{scr}}{2} \cdot 10^{-3}. \quad (20)$$

Момент на валу електродвигуна підпресовника, Н×м:

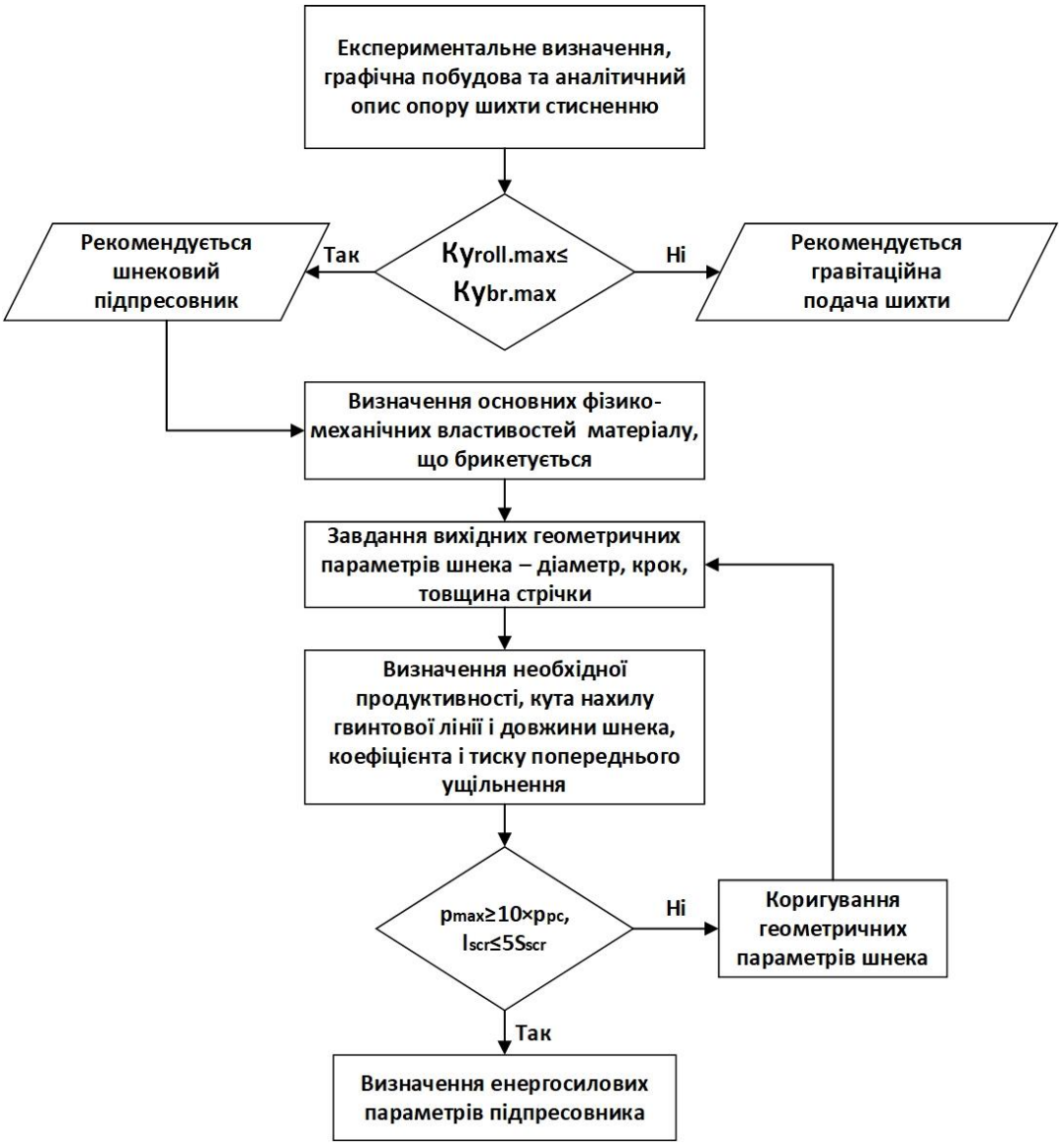

Рисунок 10 – Алгоритм розрахунку та аналізу параметрів шнекового підпресовника валкового преса

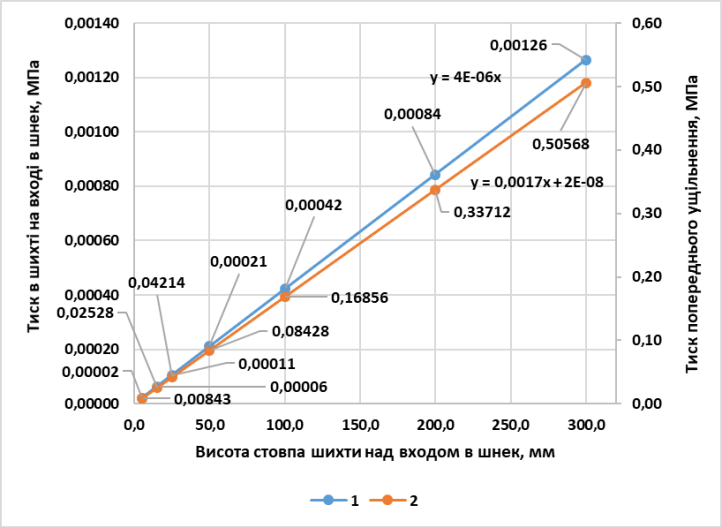

Рисунок 11 – Вплив величини стовпа шихти перед шнеком на тиск в шихті на вході в шнек і на ділянці захоплення матеріалу валками

1 – тиск шихти на вході в шнек; 2 – тиск попереднього ущільнення; крок витків шнека 100 мм; матеріал – торф

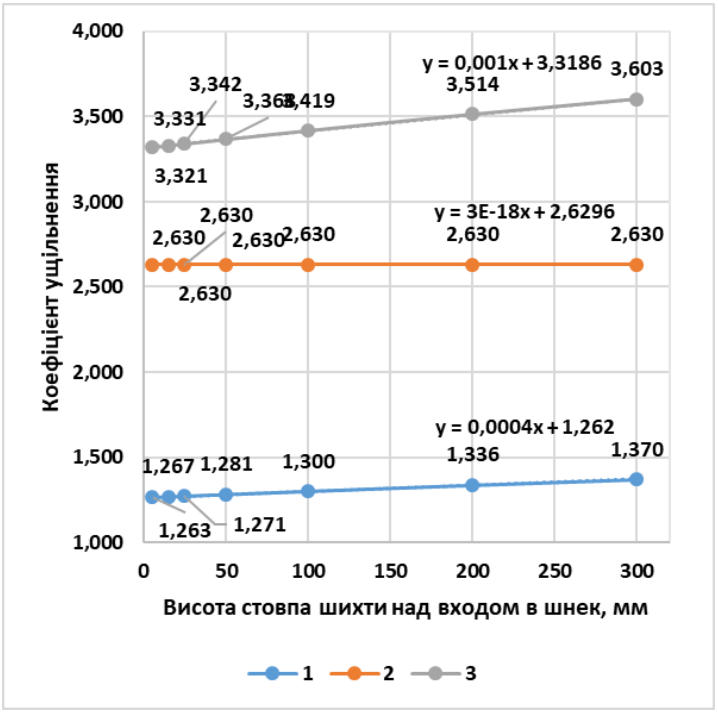

Рисунок 12 – Вплив стовпа шихти перед шнеком на величину ущільнення шихти

1 – попереднє ущільнення; 2 – ущільнення в валках; 3 – загальна величина ущільнення шихти; крок витків шнека 100 мм; матеріал – торф

$$M_{elm} = \frac{M_{scr}}{u_{scr.drive}}, \qquad (21)$$

де $u_{scr.drive}$ – передавальне число приводу підпресовника.

Потужність, споживана підпресовником:

$$N_{scr} = \frac{\pi \cdot M_{scr} \cdot n_{scr} \cdot 10^{-3}}{30 \cdot \eta_{scr}}. \qquad (22)$$

де η_{scr} – ККД приводу підпресовника.

Відповідно до виразів (7-22) складено алгоритм розрахунку і аналізу конструктивних, енергосилових і технологічних параметрів, наведений рис. 10, та досліджено їх зв'язки.

Дані, наведені на рис. 11, вказують на те, що зі збільшенням рівня стовпа шихти збільшується тиск на вході в шнек, що, в свою чергу, покращує заповнення шнековій порожнини і істотно збільшує тиск попереднього ущільнення шихти на ділянці захоплення валками. Тиск попереднього ущільнення на межі виходу матеріалу з шнека і його захоплення валками і тиск пресування в осередку деформації валкового преса визначають загальну величину ущільнення шихти, виражену коефіцієнтом ущільнення.

Графіки на рис. 12 вказують, що використання шнекового підпресовника дозволяє підвищити величину коефіцієнта ущільнення досліджуваного торфу, в середньому, на 22...27%. Для гідролізного лігніну, також дослідженого в роботі, такі показники становлять 14...17%. Такі значення приросту величини ущільнення є суттєвими і, як показує практика, дозволяють отримати якісні брикети. На рис. 13 представлений аналітичний зв'язок моменту пресування на валу шнека від кроку його гвинтової лінії та для різної висоти стовпа шихти над входом в шнек. Дані графіки вказують на те, що із зростанням стовпа шихти

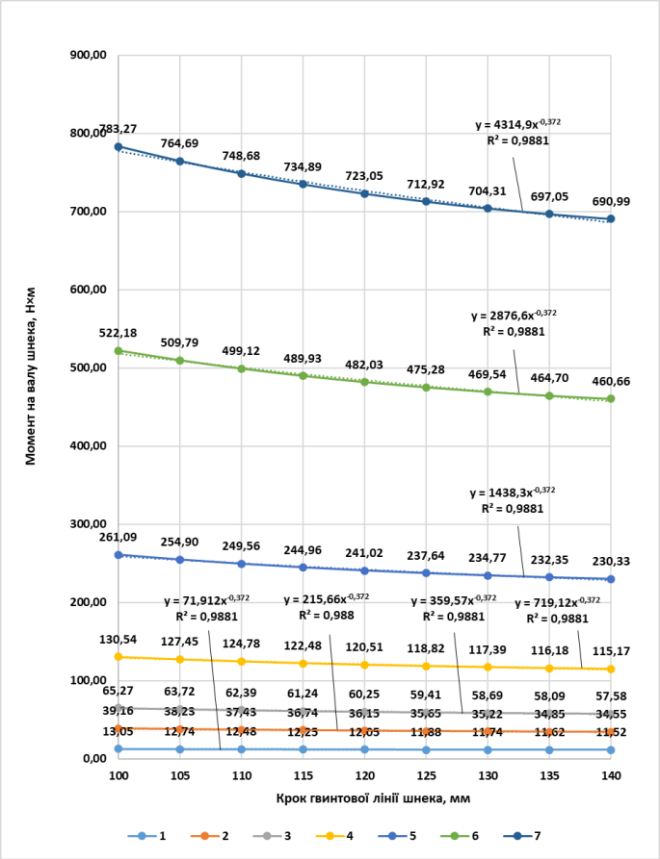

Рисунок 13 – Зв'язок величини моменту на валу шнека з кроком гвинтової лінії
висота стовпа шихти над входом в шнек: 1 – 5 мм; 2 – 15 мм; 3 – 25 мм; 4 – 50 мм; 5 – 100 мм; 6 – 200 мм; 7 – 300 мм; матеріал – торф

над входом в шнек момент, який долається шнеком, зростає. Дані криві з достатнім ступенем точності описуються ступеневими, експоненціальними та логарифмічними рівняннями, що дозволяє використовувати їх для побудови прогнозних моделей роботи шнекових підпресовників валкових пресів.

Аналіз апроксимації кривих, що представлені на рис. 13 рівняннями ступеневого типу:

$$M_{scr} = a_{l.scr} \times S_{scr}^{b.batch} \qquad (23)$$

дозволив встановити, що коефіцієнт $a_{l.scr}$ в інтегральному вигляді характеризує конструктивні параметри шнекового підпресовника, а коефіцієнт $b.batch$ – відображає вплив фізико-механічних властивостей шихти.

На рис. 14, 15 в графічному вигляді представлені взаємозв'язки між конструктивними, технологічними та енергосиловими параметрами шнекового підпресовника.

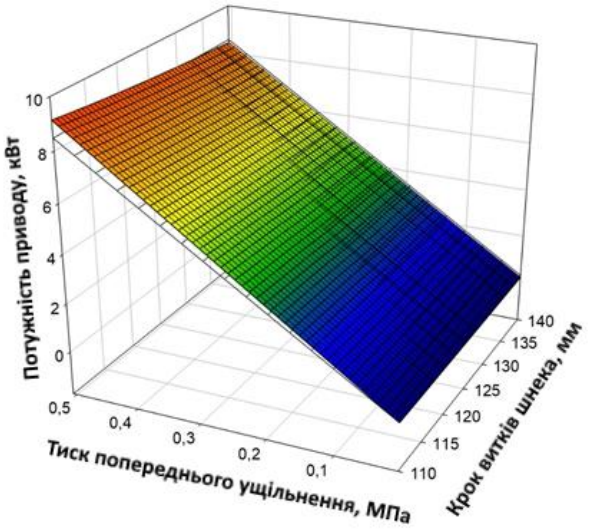

Рисунок 14 – Зв'язок потужності приводу підпресовника, кроку гвинтової лінії та тиску попереднього ущільнення; матеріал – торф; висота стовпа матеріалу над входом в шнек – 100 мм

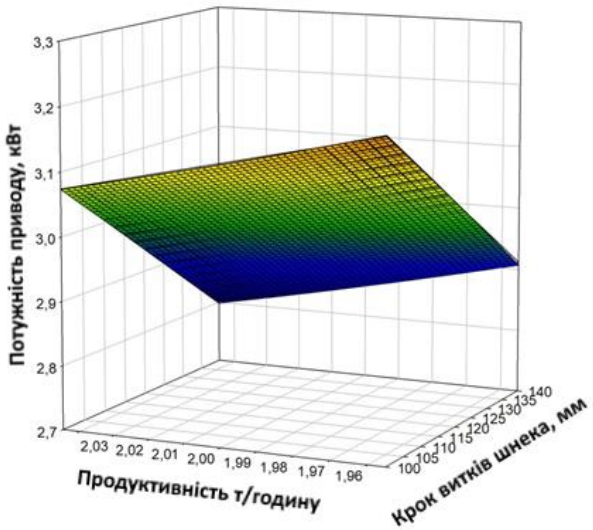

Рисунок 15 – Зв'язок потужності приводу підпресовника, кроку гвинтової лінії шнека та продуктивності підпресовника; матеріал – торф; висота стовпа матеріалу над входом в шнек – 100 мм

Дані графічні залежності, відповідно, описані наступними аналітичними виразами:

$$N_{scr} = 6{,}3691\text{-}0{,}0069 \times Q_{scr}\text{-}1{,}2737 \times p_{pc},\ R^2 = 0{,}97, \quad (24)$$

$$N_{scr} = 7{,}8405\text{-}0{,}0110 \times Q_{scr}\text{-}1{,}3983 \times S_{scr},\ R^2 = 0{,}99. \quad (25)$$

Побудова таких графічних залежностей та їх математичний опис дозволяє прогнозувати взаємозв'язок конструктивних, енергосилових та технологічних параметрів (тиску попереднього ущільнення, потужності приводу і т.п.) шнекових підпресовників валкових пресів. Подібні прогнозні моделі, отримані з використанням створеного в роботі аналітичного апарату, можуть бути побудовані для інших варіацій параметрів шнекових підпресовників валкових пресів з метою вибору раціональних конструктивних рішень та режимів роботи даного обладнання.

У шостому розділі отримав розвиток комплексний метод вибору раціональних конструктивних рішень валкових пресів з використанням основних положень теорії проектування. Проектування нової конструкції валкового преса можна представити у вигляді процесу рішення двох взаємозалежних завдань: 1.Вибору структури преса (типу, кількості, умов взаємодії деталей, вузлів та інших елементів преса), тобто структурний синтез. 2. Вибору числових значень параметрів конструктивних елементів преса, тобто параметричний синтез.

Сформульовано основні положення системного проектування валкових пресів та застосування структурно-параметричного синтезу і аналізу до вирішення завдання пошуку раціональних конструкцій валкових пресів (рис. 16).

Результат структурно-параметричного синтезу раціональної конструкції валкового преса представляється у вигляді таблиць, графіків і текстових файлів, які містять достатній набір інформації для розробки в системах автоматизованого проектування пакета конструкторської документації на виготовлення валкового преса.

Структура системного підходу до визначення раціональних геометричних параметрів бандажів валкових пресів, яка включає вихідні дані, методи розрахунку параметрів брикетування і експлуатаційних характеристик обладнання, обмеження, вихідні дані у вигляді розрахункових параметрів, що характеризують проектовані валки преса і критерії оцінки раціональності конструкції бандажів, представлена на рис. 17.

Велика кількість аналізованих параметрів, значне число варіантів матеріалів, що брикетуються, і типів формуючих елементів вказують на те, що вибір раціональної конструкції валків повинен базуватися на методах багатофакторного аналізу та оптимізації. Тому, для вирішення поставленого в роботі завдання перспективним видається використання методів, що застосовуються в системах підтримки прийняття рішень.

Рішення завдання застосування методів багатофакторного аналізу до розробки раціональної конструкції валкового преса має вирішуватися постадійно. У даній роботі вирішена задача застосування методу аналізу ієрархій (МАІ) до вибору раціональної конфігурації пресуючих поверхонь валків. Для застосування МАІ до розв'язуваної в роботі задачі він трансформований у відповідності з наступною схемою:

1. Структурування проблеми вибору раціональних геометричних параметрів валків брикетних пресів у вигляді ієрархії.

2. Встановлення пріоритетів параметрів процесу брикетування, характеристик експлуатації пресового обладнання і оцінка ефективності кожного варіанта конструктивного виконання валків і формуючих елементів за цими параметрами з урахуванням прийнятих критеріїв.

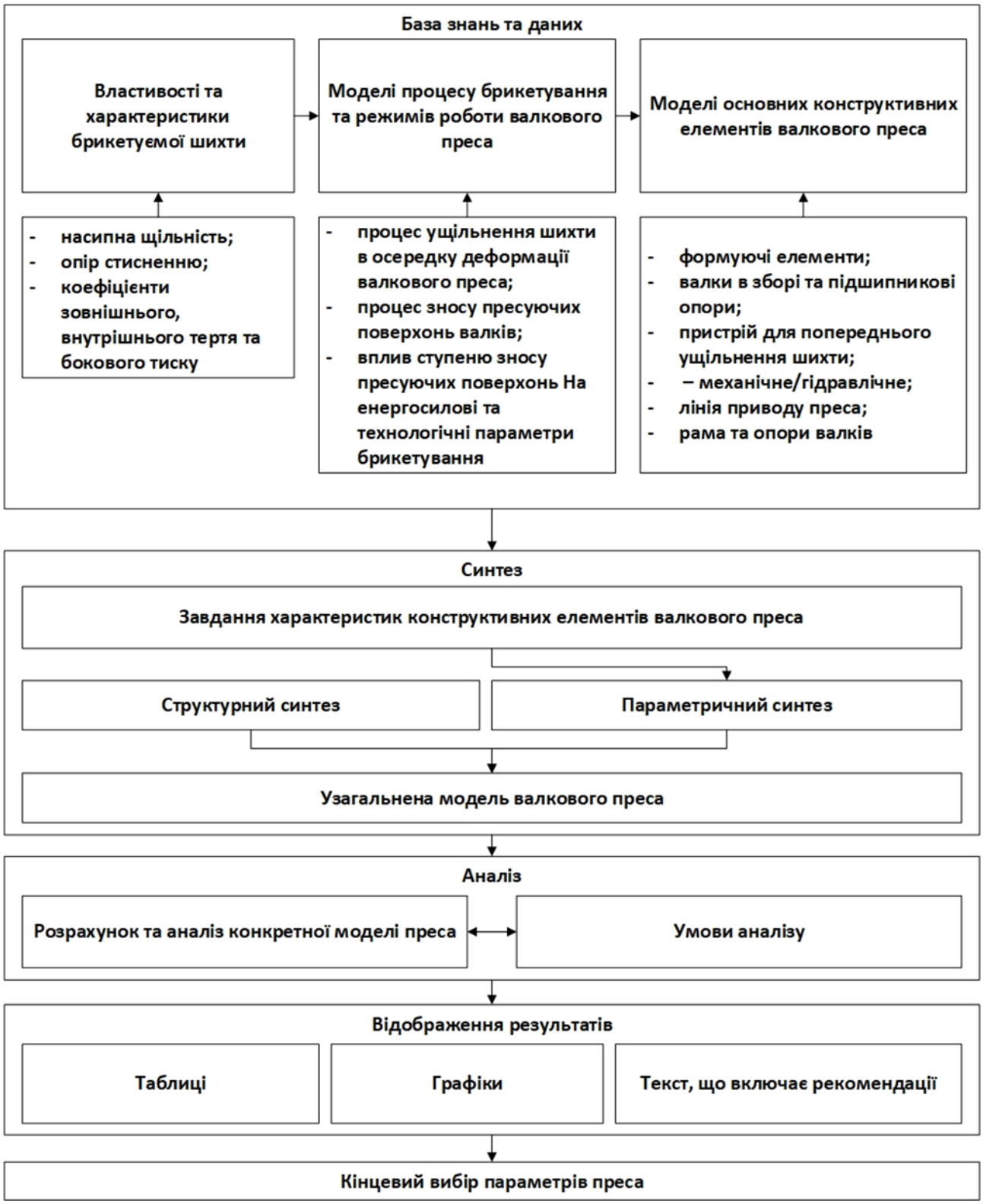

Рисунок 16 – Системний підхід до моделювання раціональної конструкції валкового преса

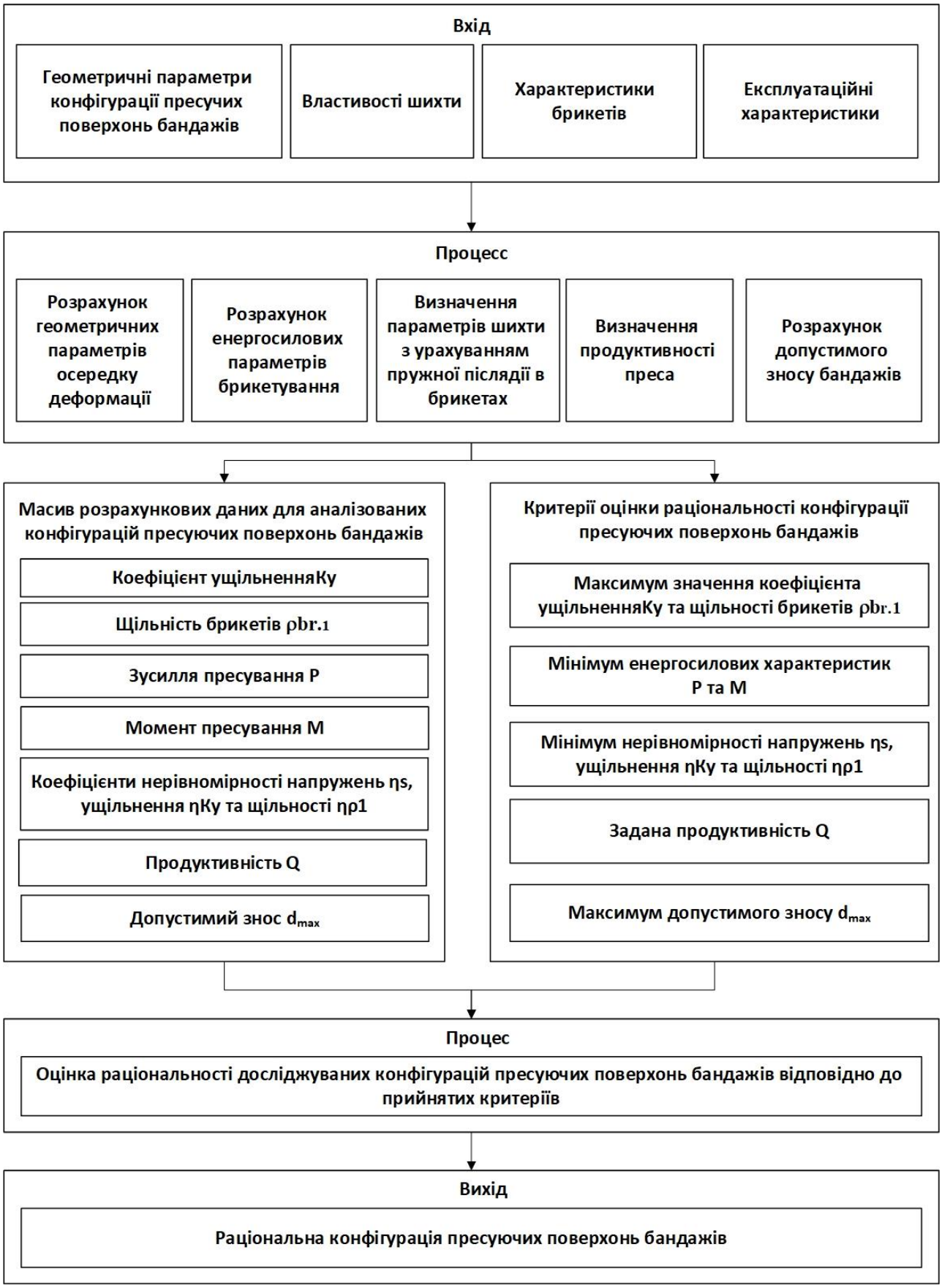

Рисунок 17 – Структура системного підходу до вибору раціональних геометричних параметрів пресуючих поверхонь бандажів валкових пресів

3. Обчислення коефіцієнтів важливості для кожного рівня ієрархії вибору раціональної геометрії валків, формуючих елементів і, при необхідності, перевірка узгодженості оцінок.

4. Обчислення комбінованого вагового коефіцієнта і вибір найкращого конструктивного виконання бандажів з усіх варіантів, що аналізуються.

Схема трирівневої ієрархії вибору раціональної конструкції робочих поверхонь бандажів валкових пресів представлена на рис. 18.

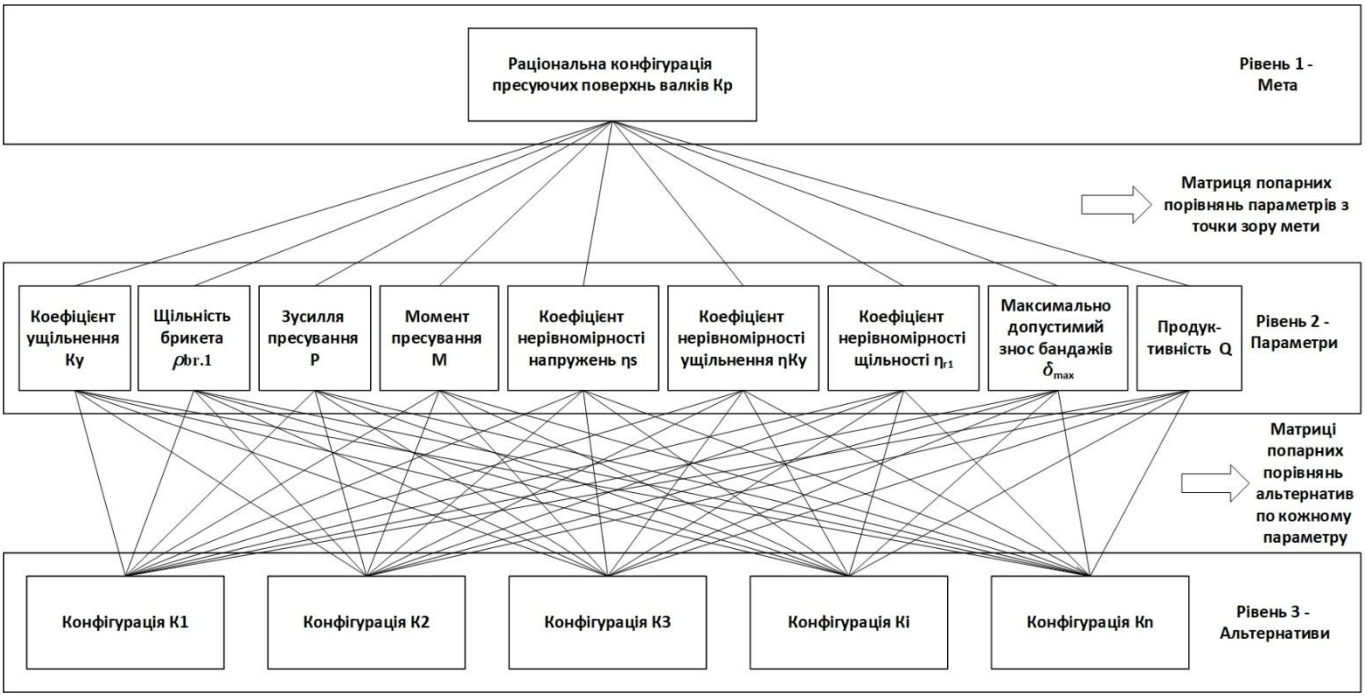

Рисунок 18 – Трирівнева ієрархія вибору раціональної конструкції бандажів валкового преса

В роботі наведено приклади застосування МАІ до рішення задач вибору раціональної конфігурації пресуючих поверхонь, одна з яких в скороченому вигляді наведена далі.

В якості матеріалу, що брикетується прийнята суміш силікомарганцю (фракція -3 мм) зі сполучною речовиною. Для аналізу розглянуті три варіанти пресуючих поверхонь бандажів (табл. 1) з формуючими елементами, розробленими в ІЧМ.

Таблиця 1 – Основні характеристики пресуючих поверхонь бандажів

Умовне позначення типорозміру пресуючої поверхні бандажів	Тип	Середній діаметр, мм	Ширина, мм	Габаритні розміри формуючих елементів, мм	Об’єм брикета, см^3
K_1	R24	648	360	36,0x60,0x27,0	48…50
K_2	R17	648	360	40,0x38,5x18,5	19…20
K_3	R10	648	360	25,6x25,0x10,5	10…12

Оцінка прийнятих конструкцій бандажів ведеться за наступними параметрами k_i: 1. Досягнутий коефіцієнт ущільнення *Ку* – k_1. 2. Зусилля пресування P_i, кН – k_2. 3. Момент пресування M_i, кН×м – k_3. 4. Продуктивність Q_i, т/ч – k_4. 5. Максимально допустимий знос δ_{max}, мм – k_5.

В розв'язуваній задачі найбільшу важливість має можливість досягнення заданої величини ущільнення шихти, що брикетується. Тому параметр k_1 (Ky) буде мати максимальну пріоритетність. Відсів силікомарганцю – це твердий (≈43 HRC) абразивний матеріал, тому другим за пріоритетністю параметром буде величина максимально допустимого зносу бандажів δ_{max}, яка визначає ресурс експлуатації валків. Параметри k_2 і k_3 – зусилля P_i і момент пресування M_i, що відносяться до енергосилових показників процесу брикетування, є третіми за значимістю та матимуть однаковий ступінь переваги. З огляду на те, що шихта на основі силікомарганцю має значну насипну щільність та на умови її ущільнення і якість брикетів швидкість пресування впливає незначно, то продуктивність Q_i буде мати в даному прикладі найменшу пріоритетність, так як її можна регулювати в широкому діапазоні шляхом зміни частоти обертання валків преса. Виходячи з прийнятих посилань, виконано аналіз ефективності досліджуваних конфігурацій пресуючих поверхонь із застосуванням методу аналізу ієрархій.

Для визначення пріоритетів досліджуваних конструкцій бандажів окремо по кожному параметру використані значення аналізованих параметрів для розглянутих типів формуючих елементів, які наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри, що характеризують аналізовані конструкції пресуючих поверхонь бандажів

Ki, i=1…3	Параметри ki, i=1…5				
	Ky_i	P_i, кН	M_i, кН×м	Qi, т/год	δ_{max}, мм
K_1	2,28	484,0	48,0	26,548	11,3
K_2	2,30	480,0	46,7	17,570	9,3
K_3	2,32	368,0	37,0	14,867	6,5

В результаті розрахунків для даного прикладу визначено:

1. Найбільшу вагу має оцінка значення коефіцієнта ущільнення (45,0%), далі йде максимально допустимий знос (36,2%), енергосилові показники зусилля і момент пресування мають рівну частку важливості (6,5%), і, нарешті, найменш значимий в даному прикладі параметр – продуктивність (5,7%).
2. Критерієм вибору найбільш раціонального варіанта є максимум величини ущільнення $Ky \rightarrow Ky_{max}$. За параметром Ky (k_1) найбільший пріоритет мають бандажі з пресуючою поверхнею K_3 (33,6%), далі йде K_2 (33,3%) і потім K_1 (30,0%).
3. Зусилля пресування P_i (параметр k_2) – критерій раціональності $P_i \rightarrow P_{min}$. Пріоритети бандажів по зусиллю пресування – K_1 30,1%, K_2 30,3%, K_3 33,6%.
4. Момент пресування M_i (параметр k_3) – критерій раціональності $M_i \rightarrow M_{min}$. Пріоритети бандажів по моменту пресування P_i – K_1 30,1%, K_2 30,9%, K_3 39,0%.
5. Продуктивність Q (параметр k_4) – критерій пріоритетності $Q \rightarrow Q_{max}$. Ступінь пріоритетності бандажів за параметром продуктивності – K_1 45,0%, K_2 29,8%, K_3 25,2%.
6. Максимально допустимий знос δ_{max} (параметр k_5) – критерій раціональності $\delta_{max} \rightarrow \delta_{max}max$. Пріоритетність за цим параметром наступна – K_1 42,0%, K_2 33,9%, K_3 24,1%.

Для остаточного вибору раціональної конфігурації пресуючої поверхні бандажів виконано адитивну згортку параметрів по кожній з аналізованих конфігурацій. Встановлено, що за сукупністю параметрів найбільш раціональною є конструкція бандажів K_1, для неї остаточний пріоритет Y_1=0,37 (37%), далі йде K_2, для якої Y_2=0,33 (33%) та на останньому місці знаходиться K_3 – Y_3=30 (30%).

Таким чином, на конкретних прикладах показана можливість використання МАІ для вибору раціональної конфігурації пресуючих поверхонь валків з врахуванням пріоритетності досліджуваних параметрів.

У сьомому розділі на базі проведених в роботі досліджень запропоновані вдосконалені конструктивні рішення наступних вузлів валкових пресів: рама преса, що компонується за модульним принципом; вдосконалена конструкція валків з використанням швидкоз'ємних затискних елементів; система захисту валків від перевантаження; підпресовник шнекового типу.

З використанням технічних рішень, створених в роботі, розроблена документація на виготовлення валкового преса вдосконаленої конструкції. Прес розроблений в двох модифікаціях. Перша – для роботи з гравітаційною подачею шихти в осередок деформації зі збільшеною шириною робочої поверхні валків (2×360 мм) для досягнення високої продуктивності. Друга модифікація преса відрізняється зменшеною шириною робочої поверхні валків (2×202 мм) і оснащена підпресовниками шнекового типу, які дозволяють брикетувати матеріали з малою насипною щільністю (0,6≤ г/см^3), зниженою сипучістю та таких, що потребують досягнення

Рисунок 19 – Валковий прес ПБВ-648/360-200П-19

Таблиця 3 – Основні технічні характеристики валкового брикетного преса ПБВ-648 / 360-200П-19

Тип преса	Валковий
Зусилля пресування максимальне, кН	2000
Тип пристрою захисту валків від перевантажень	Механічний
Продуктивність, т/год	≈3…17,5*
Максимальний момент пресування, кН×м	71
Діаметр валків, мм	648
Ширина валків, мм	360
Номінальна частота обертання валків, хв$^{-1}$	7
Потужність привода, кВт	75
Параметри формуючих елементів/брикетів	
- об'єм, см^3	19…21
- розміри, мм	40,0x38,5x18,5
Тип підпресовника	Шнековий
Номінальний момент підпресовника, Н×м	1500
Номінальна частота обертання шнека, хв$^{-1}$	90
Потужність приводу підпресовника,	15
Габаритні розміри преса, мм	≈3715x2200x4300
Маса преса, кг	≈11000
Маса преса з підпресовником, кг	≈12000

* Залежить від насипної щільності шихти, частоти обертання валків, розмірів і щільності брикетів

високих значень коефіцієнта ущільнення (≥3,0). Розроблені модифікації валкових пресів призначені для брикетування дрібнофракційних матеріалів, переважно, фракції 0...5 мм.

З використанням запропонованого в роботі комплексного методу вибору раціональних конструктивних рішень розроблена вдосконалена модель валкового преса (рис. 19, табл. 3), яка скомпонована за модульним принципом та призначена для виробництва брикетів, в тому числі, з композитних дрібнофракційних сировинних матеріалів з високою насипною щільністю (≥0,6 г/см^3) при гравітаційній подачі матеріалу в валки, а також матеріалів, що мають малу насипну щільність (0,2...0,6 г/см^3) при оснащенні преса шнековим підпресовником.

Виконано порівняльний аналіз показників ефективності створеного преса з показниками пресів інших розробників, в результаті якого встановлено: 1. Поєднання величини силових параметрів (максимальне і питоме зусилля пресування) і продуктивності відповідають середнім значенням аналогічних машин провідних виробників і дозволяють брикетувати широкий спектр дрібнофракційних матеріалів, як з малою насипною щільністю (0,2...0,6 г/см^3), так і з високою (≥0,6 г/см^3). 2. Співвідношення маси преса і його продуктивності показує, що в порівнянні з аналогічними валковими машинами він має хороші показники, а по відношенню до штемпельних пресів має незаперечну перевагу. 3. Розроблений прес при максимальному значенні продуктивності (17,5 т/год) має питому енергоємність 5,14 кВт×год/т. Це є хорошим показником для валкового преса і суттєво відрізняється в кращу сторону в порівнянні з штемпельним пресом. При цьому слід враховувати, що існує значна кількість фракційних шихт, схильних до псевдорозрідження в осередку деформації, які мають чітко виражену пружну післядію. В цьому випадку для отримання якісних брикетів доводиться знижувати частоту обертання шнека і валків. У такому режимі спостерігається зростання силових параметрів брикетування і збільшення енергоємності преса, що в ряді технологічних ліній цілком припустимо.

Розроблений прес є перспективною розробкою при створенні та впровадженні технологій для виробництва брикетів з металургійної, хімічної сировини та енергетичноцінних матеріалів.

ВИСНОВКИ

На підставі наукових узагальнень, теоретичних розробок і промислових досліджень в дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема створення сучасного пресового обладнання для брикетування дрібнофракційної сировини для різних галузей промисловості шляхом розвитку наукової бази для синтезу раціональних компонувальних і конструктивних рішень валкових пресів з урахуванням вимог щодо здійснення технологічного процесу пресування.

1. На основі запропонованої концепції оцінки впливу ступеня зносу бандажів валкових пресів на параметри брикетування, яка полягає у встановлені взаємозв’язку між контактними напруженнями на робочих поверхнях бандажів, характером та величиною їх зносу, енергосиловими та технологічними параметрами брикетування, вперше розроблено розрахунково-аналітичний метод та математичну модель щодо визначення геометричних параметрів зносу робочих поверхонь валків на різних стадіях їх експлуатації. Зазначений метод є

основою для розробки раціональних режимів брикетування та експлуатації преса на різних стадіях зносу бандажів і ефективних методів відновлення робочих поверхонь валків з метою збільшення ресурсу експлуатації.

2. На базі встановлених взаємозв’язків між величиною зносу бандажів, технологічними і енергосиловими параметрами брикетування вперше створений метод прогнозної оцінки технологічних і енергосилових параметрів брикетування на різних стадіях зносу бандажів валкових пресів. Даний метод реалізує комплексний підхід до вирішення завдання з визначення раціональних режимів роботи бандажів валкових пресів на різних стадіях їх зносу з врахуванням багатофакторності процесів брикетування і зношування бандажів. Показана практична реалізація запропонованого методу до прогнозування взаємозв'язку ступеня зносу бандажів з параметрами процесу брикетування для різних конфігурацій формуючих елементів та шихт, що брикетуються.
3. Експериментально встановлені та аналітично описані залежності коефіцієнта ущільнення шихти, пружної післядії брикетів, їх щільності та розущільнення від тиску пресування. На базі досліджень запропоновано експериментально-аналітичний метод оцінки впливу конфігурації формуючих елементів на пружну післядію брикетів, який засновано на використанні полів напружень та включає побудову епюр розподілу напружень, пружної післядії та щільності після пружного розширення. Розроблено алгоритм реалізації запропонованого методу. Виконаний комплекс експериментальних та аналітичних досліджень дозволив створити науково-методичну базу для оцінки впливу конструктивних параметрів формуючих елементів валкових пресів на пружну післядію та якість брикетів.
4. Запропоновано комплексний метод обґрунтованого вибору раціональної конфігурації формуючих елементів валків брикетного пресу, який засновано на розроблених методах оцінки впливу конфігурації формуючих елементів на пружну післядію брикетів та прогнозування зносу робочих поверхонь бандажів валків. Показана можливість використання запропонованого методу до рішення наступних задач: прогнозування та оцінки впливу конфігурації формуючих елементів та параметрів ущільнення на пружну післядію; визначення раціональних геометричних параметрів формуючих елементів, забезпечуючи отримання брикетів з заданою щільністю з урахуванням їх пружної післядії після зняття навантаження; моделювання нових типорозмірів формуючих елементів для зниження негативного впливу нерівномірності розподілу ущільнення у брикеті. З використанням комплексного методу розроблено новий формуючий елемент, який дозволяє за рахунок збільшення рівномірності розподілу ущільнення матеріалу, що брикетується знизити негативний вплив пружної післядії на якість брикетів.
5. Теоретично досліджено взаємозв’язок між величиною ущільнення та тиском пресування з урахуванням швидкості пресування шихти у міжвалковому просторі та запропоновано рівняння, що описує даний зв'язок $p = k_n \cdot a \cdot Ky^b$, де k_n – поправочний коефіцієнт. На базі запропонованого рівняння створено експериментально-аналітичний, який дозволяє для обраної швидкості пресування (частоти обертання валків) оцінити величину тиску, що розвивається

в осередку деформації і, відповідно, максимально можливий коефіцієнт ущільнення. Виконаний порівняльний аналіз експериментальних даних впливу частоти обертання валків пресів на параметри брикетування дрібнофракційних матеріалів та прокатки порошків у гладких валках підтвердив правомірність прийнятих теоретичних передумов та якісну відповідність результатів розрахунково-аналітичних досліджень фізичним процесам, які протікають при брикетуванні дрібнофракційних шихт в валковому пресі при зміні швидкості пресування.

6. З урахуванням фізико-механічних властивостей шихти та геометричних параметрів осередку деформації у міжвалковому просторі сформульовані вимоги для визначення необхідності використання шнекового підпресовника у складі конструкції валкового преса. Запропоновано вирази, які дозволяють визначити коефіцієнт попереднього ущільнення шихти у шнековому підпресовнику та його енергосилові параметри.
7. Встановлено взаємозв’язки між конструктивними, енергосиловими та технологічними параметрами шнекового підпресовника валкового пресу, на основі яких розроблено аналітичний метод та алгоритм визначення його раціональних конструктивних рішень. Проведено розрахунково-аналітичні та промислові дослідження енергосилових та технологічних параметрів шнекового підпресовника валкового пресу, результати яких підтвердили адекватність прийнятих теоретичних положень та запропонованого методу.
8. Сформульовані основні положення використання структурно-параметричного синтезу та аналізу до рішення задачі пошуку раціональних конструкцій валкових пресів. Розроблено ієрархічну структуру декомпозиції валкових пресів, яка заснована на класифікації їх компонувальних та конструктивних рішень. Розроблено алгоритм структурно-параметричного синтезу та спосіб його реалізації стосовно до пошуку раціональної конструкції валкових пресів, які формуються за модульним принципом.
9. Розроблено метод, який реалізує комплексний системний підхід до визначення раціональної конфігурації формуючих елементів бандажів валкових пресів, створений на основі трансформованого методу аналізу ієрархій, який враховує встановлені зв'язки геометричних параметрів формуючих елементів з енергосиловими та технологічними характеристиками брикетування і показниками експлуатації бандажів. Практична значимість запропонованого методу полягає в тому, що він дозволяє на стадії створення валкових пресів здійснити порівняльний аналіз, оцінку з урахуванням параметрів брикетування та обґрунтувати вибір раціональної конфігурації формуючих елементів.
10. Виконані наукові дослідження дозволили розробити нові модифікації валкових пресів конструкції ІЧМ:
    - прес з гравітаційною подачею шихти в осередок деформації зі збільшеною шириною робочої поверхні валків (2×360 мм) для досягнення високої продуктивності;
    - прес з шириною робочої поверхні валків (2×202 мм) оснащений підпресовниками шнекового типу, які дозволяють брикетувати матеріали з

малою насипною щільністю (0,6≤ г/см^3), зниженою сипучістю та таких, що потребують досягнення високих значень коефіцієнта ущільнення (≥3);

- прес, скомпонований за модульним принципом, та призначений для виробництва брикетів, в тому числі, з композитних дрібнофракційних сировинних матеріалів з високою насипною щільністю (≥0,6 г/см^3) при гравітаційній подачі матеріалу в валки, а також матеріалів, що мають малу насипну щільність (0,2...0,6 г/см^3) при оснащенні преса шнековим підпресовником.

Також в роботі створені конструктивні рішення деталей та вузлів валкових, які впроваджені на ряді підприємств, що підтверджено відповідними актами.

Розроблена конструкторська документація на виготовлення вдосконаленої конструкції преса та передана до ДП «Експериментально-виробниче підприємство ІЧМ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science

1. Effect of the geometrical parameters of roll press forming elements on the briquetting process: analytical study / K.V. Bayul // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2012. – Vol.51. – p.157-164. https://doi.org/10.1007/s11106-012-9411-8.
2. Синтез рациональной конструкции валкового пресса для производства композитного твердого топлива / К.В. Баюл // Problemele energeticii regionale. (Проблемы региональной энергетики). – 2019. – №2(43). – С.103-116. DOI:10.5281/zenodo.3367048.
3. Selection of rational surface configuration for roller press tires / Baiul K., Solodka N., Khudyakov A. et al. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2020 – Vol.59 – №1-2 – p.9-20. https://doi.org/10.1007/s11106-020-00133-w.
4. The experimental study of compaction parameters and elastic after-effect of fine fraction raw materials / K. Baiul, A. Khudyakov, S. Vashchenko, P. Krot, N. Solodka // Mining Science. – 2020. – Vol.27. – p.7–18. https://doi.org/10.37190/msc202701.
5. Selecting the Batch Composition in Briquetting / S.V. Vashchenko, A. Yu. Khudyakov, K. V. Baiul, Yu. S. Semenov // Steel in Translation. Allerton Press, Inc. – 2018. – Vol.48 – p. 509-512. https://doi.org/10.3103/S0967091218080132
6. Kaolin Raw Material Briquetting for Lump Chamotte Production. / A.Yu. Khudyakov, S.V. Vashchenko, K.V. Bayul, et al. // Refractories and Industrial Ceramics. – 2018. – Vol. 59. – p.333–337. https://doi.org/10.1007/s11148-018-0231-3.

Статті у наукових фахових виданнях

7. Исследование влияния скорости уплотнения на результаты брикетирования мелкофракционных шихт в валковых прессах / В. А. Носков, К. В. Баюл, Б. Н. Маймур, В. И. Петренко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – №3. – С.113-117.
8. Выбор рациональных путей повышения производительности валкового пресса для брикетирования / В.И. Большаков, Б.Н. Маймур, В.И. Петренко, И.Г. Муравьева,

С.В. Ващенко, К.В. Баюл // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. - №6. – С.79-82.

9. Разработка технических решений, обеспечивающих контроль и регулирование режимов работы валковых брикетных прессов / К. В. Баюл, Б. Н. Маймур, Н. А. Солодкая // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 19. – К.: Наукова думка. – 2009. – С. 317-324.
10. Разработка и испытания средств контроля усилия прессования в валковых прессах / Б.Н. Маймур, К.В. Баюл, А.Т. Лебедь, В.И. Петренко и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2009. – Вип. 20. – С.320-327.
11. Анализ условий эксплуатации, износа и конструктивных особенностей валков брикетных прессов / К.В. Баюл // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2010. – Вип. 21. – С. 331-340.
12. Выбор концепции и методов исследования влияния износа бандажей валковых прессов на технологические и энергосиловые параметры процесса брикетирования / К.В. Баюл, В.И. Петренко, Б.Н. Маймур // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2011. – Вип. 24. – С. 241-246.
13. Аналитическое исследование влияния геометрических параметров формующих элементов валковых прессов на процесс брикетирования / К.В. Баюл // Порошковая металлургия – 2012. – №3/4. – С.38-49.
14. Анализ контактных напряжений на рабочих поверхностях бандажей валкового пресса / К.В. Баюл, В.И. Петренко // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2012. – Вип.25. – С. 243-253.
15. Метод оценки износа бандажей валковых прессов на различных стадиях их эксплуатации / К.В. Баюл, В.И. Петренко // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України. Вип.26. – С. 270-281.
16. Анализ современных машин для брикетирования мелкофракционных сырьевых материалов / В.И. Большаков, К.В. Баюл // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №4. – С. 92-96.
17. Метод оценки влияния износа бандажей валковых прессов на технологические и энергосиловые параметры брикетирования / К.В. Баюл, В.И. Петренко // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. — Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2013. – Вип.27. – С. 266-274.
18. Разработка экспертной системы принятия оптимальных решений, обеспечивающих увеличение ресурса эксплуатации бандажей валковых прессов / К.В. Баюл, В.И. Петренко // Системні технології. Регіональний межвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (85). – Дніпропетровськ, 2013. – С. 3-11.
19. Исследование условий и механизмов формирования прочностных связей в прессовках при брикетировании мелкофракционных шихтовых материалов / С.В. Ващенко, Б.Н. Маймур, В.И. Петренко, К.В. Баюл, Н.А. Солодкая, Э.Б. Прокудина // Фундаментальные и прикладные проблемы черной

металлургии: Сб. научн. тр. — Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2015. – Вип.30. – С. 343-357.
20. Состояние разработок и направления совершенствования конструкции и параметров эксплуатации валковых прессов / К.В. Баюл, А.Т. Лебедь, С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – №7. – С.117-120.
21. Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності огрудкування агломераційних шихт / О.Ю. Худяков, М.М. Бойко, Н.В. Полякова, В.І. Петренко, С.В. Ващенко, К.В. Баюл // Системні технології: регіон. міжвуз. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2016. – №5 (106). – С.62-72.
22. Разработка метода оценки влияния конфигурации формующих элементов валковых прессов на упругое последействие в брикетах / К.В. Баюл, А.Ю. Худяков, С.В. Ващенко, Н.А. Солодкая // Системні технології. Регіональний межвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (110). – Дніпро, 2017. – С.3-9.
23. Експериментальне дослідження підвищення технологічності брикетів феросиліцію для виробництва сталі / В.П. Піптюк, Д.М. Тогобицька, К.В. Баюл, І.М. Логозинський, Б.А. Левін, О.П. Петров, С.В. Греков, Г.О. Андриєвський // Сучасні проблеми металургії. №21 Вип.1. – 2018. – С. 50-55.
24. Гидравлическое устройство для защиты валкового пресса от перегрузок / К.В. Баюл, А.Т. Лебедь, С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2018. – №7. – С. 159-164.
25. Способ выбора рациональной конфигурации рабочих поверхностей бандажей валкового пресса / К.В. Баюл, Н.А. Солодкая, А.Ю. Худяков, С.В. Ващенко // Порошковая металлургия. – №01/02. – 2020. – С.14-31.
26. Загальна класифікація та системний підхід до розробки конструкцій валкових пресів / К.В. Баюл, І.Г. Муравйова, С.В. Ващенко, О.Ю. Худяков, Н.О. Солодка // Метал і лиття України. 2021. – №2 – С.64-74.

Статті у спеціалізованих наукових виданнях

27. Научные основы технологии и оборудования для брикетирования техногенных отходов / В.И. Большаков, Б.Н. Маймур, К.В. Баюл // Бюл. научно-технической информации. Черная металлургия. – Вып. 8. – 2009. – С. 54-59.
28. Брикетирование Металлургического сырья. Актуальность и пути развития метода / Б.Н. Маймур, А.Ю. Худяков, В.И. Петренко, С.В. Ващенко, К.В. Баюл // Бюл. научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. – Вып. 1. – 2016. – С. 74-81.
29. Разработка критериев выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов / К.В. Баюл, А.Ю. Худяков, С.В. Ващенко, Н.А. Солодкая // Комп'ютерне моделювання: аналіз, управління, оптимізація. Збірник наукових праць. – №1. – Дніпро, 2016. – С.7-11.
30. Развитие научно-методической базы оценки влияния параметров формующих элементов на упругое последействие в брикетах / К.В. Баюл, В.И. Петренко, Б.Н. Маймур, С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков, Н.А. Солодкая // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2017. – Вып. 31. – С.298-308.

31. Формирование рекомендаций по разработке высокопроизводительного валкового пресса усовершенствованной конструкции / К.В. Баюл, С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков, Н.А. Солодкая, Э.Б. Прокудина // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 32. – Днепр. – 2018. – С. 402-414.
32. Альтернативные способы грануляции тонкоизмельченных железорудных концентратов / А.Ю. Худяков, М.Н. Бойко, К.В. Баюл, С.В. Ващенко, Н.В. Полякова, В.И. Петренко // Бюл. научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. – Вып. 1. – 2018. – С. 48-53.
33. Брикетирование каолинового сырья для производства кускового шамота / А.Ю. Худяков, С.В. Ващенко, К.В. Баюл, Ю.С. Семенов // Новые огнеупоры. 2018. – №8. – С.14-19. https://doi.org/10.17073/1683-4518-2018-8-14-19.
34. Технологии и оборудование для брикетирования мелкофракционных материалов в ферросплавном производстве / К.В. Баюл, А.Ю. Худяков, С.В. Ващенко // Новости науки Казахстана. 2018. – № 4(138). – С.108-119.
35. Теоретические основы методики расчета и составления шихт с минимальной порозностью / А.Ю. Худяков, С.В. Ващенко, М.Н. Бойко, К.В. Баюл, Ю.С. Семенов // Бюл. научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. – Вып. 7. – 2018. – С. 23-32.
36. Разработка научно-методического к выбору состава брикетируемой шихты и ее свойств / С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков, К.В. Баюл, Ю.С. Семенов // Сталь. – 2018. – №8. – С.2-6.
37. Разработка эксплуатационной карты бандажей валковых брикетных прессов / К.В. Баюл, С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков // Механика машин, механизмов и материалов. – №1(46). – 2019. – С.40-46.
38. Создание локальных моделей адгезионного сцепления частиц при брикетировании / С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков, К.В. Баюл, Ю.С. Семенов // Сталь. – №5. – 2019. – С.4-8.
39. Науково-технічні рішення щодо виготовлення та подальшої експлуатації вдосконаленого валкового пресу конструкції з розширеними технологічними можливостями та підвищеним ресурсом експлуатації / К.В. Баюл, С.В. Ващенко, О.Ю. Худяков, Н.О. Солодка, Е.Б. Прокудіна // Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2016–2020 рр. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – Київ, 2020. – С.564-571.

Патенти

40. Патент України. Номер патенту UA 121145 C2. Валковий брикетний прес / К.В. Баюл, С.В. Ващенко, О.Ю. Худяков, Н.О. Солодка // Номер заявки a2018 03830. Опубл. 04.10.2020 р. Бюл. №17.
41. Патент України. UA128969U. Машина для миття металевої стружки / О.В. Чернишов, О.О. Чернишов, С.І. Чухно, К.В. Баюл, Т.В. Лукань, Д.Г. Музичка // Номер заявки u 2018 05641. Опубл. 10.10.2018. Бюл. №19.

Матеріали наукових конференцій

42. Совершенствование валковых брикетных прессов для утилизации отходов производства горно-металлургического комплекса / К.В. Баюл, Б.Н. Маймур,

В.И. Петренко, С.В. Ващенко // Екологічні проблеми гірничо-металургійного комплексу України за умов формування принципів збалансованого розвитку. – Матеріали науково-практичної конференції. – К. Центр екологічної освіти та інформації, 2008. – С.193-197.

43. Создание научных предпосылок увеличения ресурса эксплуатации бандажей валковых прессов / К.В. Баюл // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні ресурсозбережні матеріали та зміцнювальні технології». Присвячена 20-річчю Кафедри «Матеріалознавство». – Маріуполь: ПДТУ, 2012. – С.135-137.
44. Реализация системного подхода к прогнозированию параметров эксплуатации бандажей валковых прессов для брикетирования отсевов ферросплавов / К.В. Баюл, Н.А. Солодкая // Надежность металлургического оборудования. Сборник научных статей по материалам Международной научно-технической конференции, 28–31 октября 2013. Днепропетровск (Украина). Ответственный редактор В.И. Большаков. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2013. – С.132-137.
45. Исследования зависимостей между параметрами уплотнения и упругим последействием с учетом свойств брикетируемых материалов / К.В. Баюл, С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков // Матеріали І Всеукраїнській науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем», Частина 1, Дніпропетровськ 2015 – С.31-37.
46. Оценка возможностей улучшения подготовки агломерационной шихты к спеканию / А.Ю. Худяков, М.Н. Бойко, С.В. Ващенко, К.В. Баюл, Н.В. Полякова // Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти. Збірник наукових праць Всеукраїнської науково-технічної конференції, присвяченої 100-річчу з дня народження Г. Г. Єфименка – Дніпро.: Національна металургійна академія України, 2017. – С.293-298.
47. Анализ производственной и технологической эффективности валковых прессов / К.В. Баюл, С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков, Н.А. Солодкая // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «Механіка машин – основна складова прикладної механіки», частина 2. – Дніпро: НМетАУ, 2017. – С.355-358.
48. Совершенствование подготовки мелкофракционных шихт к спеканию / А.Ю. Худяков, М.Н. Бойко, Н.В. Полякова, С.В. Ващенко, К.В. Баюл // Литво. Металургія. 2017: Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції (23-25 травня 2017, Запоріжжя). Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. – Запоріжжя, АА Тандем. – С.418-419.
49. Создание устройства для принудительной подачи брикетируемого материала в очаг деформации валкового пресса / К.В. Баюл, С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков // Материалы Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (26-27 апреля 2018, Могилев) – Могилев, 2018. – с.70-71.
50. Моделирование минимальной порозности шихты с помощью методов фрактальной геометрии и теории вероятностей / А.Ю. Худяков, С.В. Ващенко, К.В. Баюл, Н.А. Солодкая, Э.Б. Прокудина // Материалы IV Международной научно-технической конференции КМОСС-2018, ГВУЗ УГХТУ, Днепр. – С. 125-126.

51. Разработка научно-методического подхода к выбору состава брикетируемой шихты и ее свойств / С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков, К.В. Баюл, Н.А. Солодкая, Э.Б. Прокудина // Материалы IV Международной научно-технической конференции КМОСС-2018, ГВУЗ УГХТУ, Днепр. – С.50-51.
52. Development of technical solutions aimed at improving technological capabilities, design characteristics and increasing the service life of briquette presses / Baiul Konstantin, Vashchenko Sergey, Khudyakov Alexander, Prokudina Elvira & Solodka Nataliia // Physical & chemical geotechnologies – 2018. Materials of the international scientific & practical conference – p. 40-42.
53. Разработка новой модификации формующих элементов валкового брикетного пресса / К.В. Баюл, С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков // X Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії». Харків. – 2018. – С.32-33.
54. Оценка влияния компоновочного решения валкового блока на показатели эффективности пресса для переработки кусковых и мелкофракционных материалов / К.В. Баюл, С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії», присвяченої 90-річчю заснування кафедри обробки металів тиском. Харків. – 2019. – С.38-39.
55. Optimization of wastes compaction parameters in case of gradual wear of briquetting press rolls / K. Baiul, S. Vashchenko, A. Khudyakov et al. // Proceedings of the first virtual conference on mechanical fatigue (VCMF2020) – 2020. – p. 53-54.
56. Разработка алгоритма определения рациональных параметров шнекового подпрессовщика валкового пресса / К.В. Баюл, А.Ю. Худяков, С.В. Ващенко, Н.А. Солодкая, Э.Б. Прокудина // «Компьютерное моделирование: анализ, управление, оптимизация»: материалы VI Международной научно-технической конференции. – ДВНЗ УДХТУ: Днепр. – 04-06.11.2020. – С. 182-183.

АНОТАЦІЯ

Баюл К.В. Розвиток наукових основ створення валкових пресів з розширеними технологічними можливостями та збільшеним ресурсом експлуатації – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.08 – «Машини для металургійного виробництва» – Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми створення валкових пресів з широкими технологічними можливостями та збільшеним ресурсом експлуатації для брикетування дрібнофракційних сировинних матеріалів в металургійній та суміжних галузях промисловості.

Вперше встановлено взаємозв'язки та отримано аналітичні залежності величини зносу валків з параметрами брикетування. Розроблено новий метод прогнозної оцінки параметрів брикетування при різному ступеню зносу бандажів. Використання

запропонованого методу дозволить підвищити ресурс експлуатації бандажів валкових пресів.

Вперше встановлено взаємозв'язки між напруженнями в ущільнюваній шихті і пружною післядією з урахуванням конфігурації пресуючих поверхонь. Розроблено експериментально-аналітичний метод та математичну модель визначення величини і оцінки впливу пружної післядії на якість брикетів. Використання методу дозволяє визначати раціональні геометричні параметри формуючих елементів та моделювати нові типи їх модифікації.

На основі трансформованого методу аналізу ієрархій розроблено метод та математичну модель для вибору раціональної конфігурації пресуючих поверхонь валків, які враховують зв'язки геометричних параметрів формуючих елементів з характеристиками процесу брикетування і показниками експлуатації бандажів.

Розвинені уявлення про вплив швидкості пресування шихти в осередку валкового преса на енергосилові параметри процесу брикетування. Встановлено закономірність опору шихти стисканню, яка в загальному випадку описується рівнянням $p=k_n \cdot a \cdot Ky^b$, де k_n – поправочний коефіцієнт, який враховує вплив швидкості пресування. Отримані з урахуванням розрахованого поправочного коефіцієнту криві ущільнення, що є інтегральними відображеннями властивостей шихти, дозволяють для обраної швидкості пресування (частоти обертання валків) оцінити величину тиску, що розвивається в осередку деформації і, відповідно, максимально можливий коефіцієнт ущільнення.

Отримали подальший розвиток теоретичні уявлення про взаємозв’язок конструктивних параметрів шнекового підпресовника з параметрами процесу брикетування у валковому пресі. Запропоновано математичну модель визначення раціональних конструктивних і енергосилових параметрів шнекового підпресовника, яка враховує фізико-механічні властивості шихти, що брикетується, режими роботи валкового преса та дозволяє обґрунтувати умови застосування підпресовника.

Розроблено основні положення створення конструкцій валкових пресів на базі структурно-параметричного синтезу та аналізу. Запропонована ієрархічна структура декомпозиції валкових пресів, яка заснована на класифікації їх компонувальних і конструктивних рішень за модульним принципом. Розроблено алгоритм структурно-параметричного синтезу і спосіб його реалізації до пошуку раціональної конструкції валкових пресів.

Впроваджено: технічна документація та рекомендації щодо виготовлення вдосконалених конструкцій валкових пресів (ДП «/Експериментально-виробниче підприємство Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України за участю підприємств-партнерів); технології брикетування карбіду кремнію та вдосконаленої конструкції валків преса (ТОВ «П'ятихатський завод металургійних сумішей»); експериментально-промислового шнекового підпресовника валкового преса для брикетування вуглецевих енергетично цінних дрібнофракційних матеріалів (ТОВ «Промбрикет»); рекомендацій щодо вдосконалення конструкції шнекового підпресовника та лінії приводу преса (ТОВ «Біогумос»); технології виробництва ущільненого продукту з дрібнофракційних та пиловидних залізовмісних вторинних матеріалів (ПАО «ММК Ілліча», ПАО «Азовсталь»).

Ключові слова: валковий прес, конструкція, валки, формуючі елементи, брикетування, дрібнофракційні сировинні матеріали, знос, пружна післядія, швидкість пресування, метод аналізу ієрархій, раціональне та модульне проектування, тиск пресування, напруження, щільність.

ABSTRACT

Baiul K.V. Development of scientific bases of creation of roll presses with the expanded technological possibilities and the increased service life. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.05.08 – "Machines for Metallurgical Production" – Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Dnipro, 2021.

The dissertation devoted to the solution of an important scientific and technical problem of the creation of roll presses with wide technological possibilities and the increased service life for briquetting of small fractional raw materials in metallurgical and related industries.

For the first time, relationships established and analytical dependences of the amount of roll wear with briquetting parameters obtained. A new method of predictive estimation of briquetting parameters at different degree of roll wear is developed. The use of the proposed method will increase the service life of the rolls of briquette presses.

For the first time, the relationships between stresses in the compacted material and the elastic aftereffect taking into account the configuration of the pressing surfaces were established. An experimental-analytical method and a mathematical model for determining the value and estimating the influence of the elastic aftereffect on the quality of briquettes have been developed. Using the method allows to determine the rational geometric parameters of the forming elements and to model new types of their modification.

Based on the transformed method of hierarchies analysis, new method and mathematical model for selecting a rational configuration of pressing surfaces of rolls, which take into account the relationship of forming elements geometric parameters with briquetting process characteristics and rolls exploitation parameters was created.

The ideas about the influence of pressing speed in the roll press on the briquetting process parameters developed. The regularity of the resistance of fine-grained material to compression is established, which in the general case is described by the equation $p=k_n \cdot a \cdot Ky^b$, where k_n is the correction factor, which takes into account the influence of the pressing speed. The compaction curves obtained taking into account the calculated correction factor, which are integral reflections of the properties of the compacted material, allow to estimate the value of pressure developing in the deformation center and, accordingly, the maximum possible compaction coefficient for the selected pressing speed (roll speed).

Theoretical ideas about the relationship between the design parameters of the screw feeder with the parameters of the briquetting process in the roller press were further developed. A mathematical model for determining the rational design and power parameters of the screw feeder, which takes into account the physical and mechanical properties of the briquetted material, modes of operation of the roll press and allows to justify the conditions of use of the press.

The basic provisions of creation of designs of roller presses on the basis of structural-parametric synthesis and the analysis are developed. The hierarchical structure of decomposition of roller presses which is based on classification of their layout and constructive decisions on a modular principle is offered. An algorithm for structural-parametric synthesis and a method for its implementation to find a rational design of roll presses have been developed.

Implemented: technical documentation and recommendations for the manufacture of advanced designs of roll presses (SE Research and Production Enterprise of the Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute of NAS of Ukraine, with the participation of partner companies); technologies of briquetting of silicon carbide and improved design of press rolls (LLC "Pyatihatsky metallurgical mixtures plant"); experimental-industrial screw feeder of roller press for briquetting of carbon energy-valuable materials (Prombriket LLC); recommendations for improving the design of the screw feeder and the press drive line (LLC "Biohumos"); technologies for the production of compacted product from fine-grained and pulverized iron-containing secondary materials (PJSC "MMK Ilyich", PJSC "Azovstal").

Key words: roller press, construction, rolls, forming elements, briquetting, fine fraction raw materials, wear, elastic aftereffect, deformation rate, analytic hierarchy process, rational and modular design, compaction pressure, stress, density.