НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ
імені академіка З. І. Некрасова

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

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»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

К.В. Баюл

Науковий консультант:
Муравйова Ірина Геннадіївна,
доктор технічних наук

Дніпро – 2021

АНОТАЦІЯ

Баюл К.В. Розвиток наукових основ створення валкових пресів з розширеними технологічними можливостями та збільшеним ресурсом експлуатації.

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 валкових пресів, що дозволить розробити рішення для підвищення їх ресурсу експлуатації.

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 «Дослідно-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.

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 based on structural-parametric synthesis and the analysis are developed. The hierarchical structure of decomposition of roller presses which 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 Institute of Ferrous Metallurgy named after ZI Nekrasov 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"). (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.

Основні публікації здобувача за темою дисертації

Статті, що включені до міжнародної науково-метричної баз Scopus та Web of Science

1. Effect of the geometrical parameters of roll press forming elements on the briquetting process: analytical study. **Bayul K.V.** // 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. **Баюл К.В.** // 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 – PP. 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. **Baiul K.**, Khudyakov A., Vashchenko S., Krot P., Solodka N. // Mining Science. – 2020. – Vol.27. – p. 7–18. https://doi.org/10.37190/msc202701.
5. Selecting the Batch Composition in Briquetting. Vashchenko S.V., Khudyakov A.Yu., **Baiul K.V.**, Semenov Yu. S. // Steel in Translation. Allerton Press, Inc., 2018. – PP. 509-512. https://doi.org/10.3103/S0967091218080132
6. Kaolin Raw Material Briquetting for Lump Chamotte Production. Refractories and Industrial Ceramics. Khudyakov A.Yu., Vashchenko S.V., **Bayul K.V.**, et al. // – 2018. – Vol. 59, PP.333–337. https://doi.org/10.1007/s11148-018-0231-3.

Статті у в спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ДАК України

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

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

9. Разработка технических решений, обеспечивающих контроль и регулирование режимов работы валковых брикетных прессов. **Баюл К.В.**, Маймур Б.Н., Солодкая Н.А. // 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. Маймур Б.Н., **Баюл К.В.**, Лебедь А.Т., Петренко В.И. 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. **Баюл К.В.** // 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. **Баюл К.В.**, Петренко В.И., Маймур Б.Н. // 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. **Баюл К.В.** // Порошковая металлургия – 2012. – №3/4. – С.38-49.
14. Анализ контактных напряжений на рабочих поверхностях бандажей валкового пресса. **Баюл К.В.**, Петренко В.И. // 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. **Баюл К.В.**, Петренко В.И. // 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. Большаков В.И., **Баюл К.В.** // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №4. – С. 92-96.
17. Метод оценки влияния износа бандажей валковых прессов на технологические и энергосиловые параметры брикетирования. **Баюл К.В.**, Петренко В.И. // 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. **Баюл К.В.**, Петренко В.И. // 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. Ващенко С.В., Маймур Б.Н., Петренко В.И., **Баюл К.В.**, Солодкая Н.А., Прокудина Э.Б. // 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. **Баюл К.В.**, Лебедь А.Т., Ващенко С.В., Худяков А.Ю. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – №7. – С.117-120.
21. Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності огрудкування агломераційних шихт. Худяков О.Ю., Бойко М.М., Полякова Н.В., Петренко В.І., Ващенко С.В., **Баюл К.В.** // 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. **Баюл К.В.**, Худяков А.Ю.,

Ващенко С.В., Солодкая Н.А. // 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. Піптюк В.П., Тогобицька Д.М., **Баюл К.В.**, Логозинський І.М., Левін Б.А., Петров О.П., Греков С.В., Андриєвський Г.О. // Сучасні проблеми металургії. №21 Вип.1. – 2018. – С. 50-55.
24. Гидравлическое устройство для защиты валкового пресса от перегрузок. **Баюл К.В.**, Лебедь А.Т., Ващенко С.В., Худяков А.Ю. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2018. – №7. – С. 159-164.
25. Способ выбора рациональной конфигурации рабочих поверхностей бандажей валкового пресса. **Баюл К.В.**, Солодкая Н.А., Худяков А.Ю., Ващенко С.В. // Порошковая металлургия. – №01/02. – 2020. – С.14-31.
26. Загальна класифікація та системний підхід до розробки конструкцій валкових пресів. **Баюл К.В.**, Муравйова І.Г., Ващенко С.В., Худяков О.Ю., Солодка Н.О. // Метал і лиття України. 2021. – №2. – С.64-74.

Статті у науково-технічних, в тому числі іноземних виданнях

27. Научные основы технологии и оборудования для брикетирования техногенных отходов. Большаков В.И., Маймур Б.Н., **Баюл К.В.** // Бюл. научно-технической информации. Черная металлургия. – Вып. 8. – 2009. – С. 54-59.
28. Брикетирование Металлургического сырья. Актуальность и пути развития метода. Маймур Б.Н., Худяков А.Ю., Петренко В.И., Ващенко С.В., **Баюл К.В.** // Бюл. научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. – Вып. 1. – 2016. – С. 74-81.
29. Разработка критериев выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов. **Баюл К.В.**, Худяков А.Ю., Ващенко С.В., Солодкая Н.А. // 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. **Баюл К.В.**, Петренко В.И., Маймур Б.Н., Ващенко С.В., Худяков А.Ю., Солодкая Н.А. //

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. **Баюл К.В.**, Ващенко С.В., Худяков А.Ю., Солодкая Н.А., Прокудина Э.Б. // 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. Худяков А.Ю., Бойко М.Н., **Баюл К.В.**, Ващенко С.В., Полякова Н.В., Петренко В.И. // Бюл. научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. – Вып. 1. – 2018. – С. 48-53.
33. Брикетирование каолинового сырья для производства кускового шамота. Худяков А.Ю., Ващенко С.В., **Баюл К.В.**, Семенов Ю.С. // Новые огнеупоры. 2018;(8):14-19. https://doi.org/10.17073/1683-4518-2018-8-14-19.
34. Технологии и оборудование для брикетирования мелкофракционных материалов в ферросплавном производстве. **Баюл К.В.**, Худяков А.Ю., Ващенко С.В. // Новости науки Казахстана. 2018. № 4(138). С.108-119.
35. Теоретические основы методики расчета и составления шихт с минимальной порозностью. Худяков А.Ю., Ващенко С.В., Бойко М.Н., **Баюл К.В.**, Семенов Ю.С. // Бюл. научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. – Вып. 7. – 2018. – С. 23-32.
36. Разработка научно-методического подхода к выбору состава брикетируемой шихты и ее свойств. Ващенко С.В., Худяков А.Ю., **Баюл К.В.**, Семенов Ю.С. // Сталь. – №8. – 2018. – С.2-6.
37. Разработка эксплуатационной карты бандажей валковых брикетных прессов. **Баюл К.В.**, Ващенко С.В., Худяков А.Ю. // Механика машин, механизмов и материалов. – №1(46). – 2019. – С.40-46.
38. Создание локальных моделей адгезионного сцепления частиц при брикетировании. Ващенко С.В., Худяков А.Ю., **Баюл К.В.**, Семенов Ю.С. // 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. **Баюл К.В.**, Ващенко С.В., Худяков О.Ю., Солодка Н.О., Прокудіна Е.Б. // 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. **Баюл К.В.**, Ващенко С.В., Худяков О.Ю., Солодка Н.О. // Номер заявки a2018 03830. Дата публікації 2020/10/4.
41. Патент України UA128969U. 2018. Бюл. №19. Машина для миття металевої стружки. Чернишов О.В., Чернишов О.О., Чухно С.І., **Баюл К.В.**, Лукань Т.В., Музичка Д.Г.

Матеріали наукових конференцій

42. Совершенствование валковых брикетных прессов для утилизации отходов производства горно-металлургического комплекса. **Баюл К.В.**, Маймур Б.Н., Петренко В.И., Ващенко С.В. // 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. **Баюл К.В.** // 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. **Баюл К.В.,** Солодкая Н.А. // Надежность металлургического оборудования. Сборник научных статей по материалам Международной научно-технической конференции, 28–31

октября 2013г. 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. **Баюл К.В.**, Ващенко С.В., Худяков А.Ю. / 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. Худяков А.Ю., Бойко М.Н., Ващенко С.В., **Баюл К.В.**, Полякова Н.В. // 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. **Баюл К.В.**, Ващенко С.В., Худяков А.Ю., Солодкая Н.А. // 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. Худяков А.Ю., Бойко М.Н., Полякова Н.В., Ващенко С.В., **Баюл К.В.** // Литво. Металургія. 2017: Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції (23-25 травня 2017 р., м. 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. **Баюл К.В.**, Ващенко С.В., Худяков А.Ю. // Материалы международной научно-технической конференции "Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии" (26-27 апреля 2018г., г. Могилев) – Могилев, 2018. – с.70-71.
50. Моделирование минимальной порозности шихты с помощью методов фрактальной геометрии и теории вероятностей. Худяков А.Ю., Ващенко С.В., **Баюл К.В.**,

Солодкая Н.А., Прокудина Э.Б. // Материалы IV международной научно-технической конференции КМОСС-2018, ГВУЗ УГХТУ, г. Днепр, Украина. – С. 125-126.

51. Разработка научно-методического подхода к выбору состава брикетируемой шихты и ее свойств. Ващенко С.В., Худяков А.Ю., **Баюл К.В.**, Солодкая Н.А., Прокудина Э.Б. // Материалы IV международной научно-технической конференции КМОСС-2018, ГВУЗ УГХТУ, г. Днепр, Украина. – 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. **Баюл К.В.**, Ващенко С.В., Худяков А.Ю. // 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. **Баюл К.В.**, Ващенко С.В., Худяков А.Ю. // 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. Baiul K., Vashchenko S., Khudyakov A. 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. Баюл К.В., Худяков А.Ю., Ващенко С.В., Солодкая Н.А., Прокудина Э.Б. // «Компьютерное моделирование: анализ, управление, оптимизация»: материалы VI международной научно-технической конференции. – ДВНЗ УДХТУ: Днепр. – 04-06.11.2020. – С. 182-183. (ДВНЗ УДХТУ).

ЗМІСТ

		С
ВСТУП……		17
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРАКТИЧНОГО ДОСВІДУ СТВОРЕННЯ СУЧАСНИХ ВАЛКОВИХ МАШИН ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ДРІБНОФРАКЦІЙНИХ СИРОВИННИХ МАТЕРІАЛІВ…….		27
1.1.	Загальна класифікація валкових пресів та межі їх застосування…….	27
1.2.	Узагальнення та аналіз основних технічних та конструктивних рішень вузлів та механізмів валкових пресів…….	34
1.2.1.	Огляд сучасних валкових пресів для переробки сировинних матеріалів…….	34
1.2.2.	Особливості конструкцій валкових пресів ІЧМ……...	43
1.2.3.	Компонувальні рішення пресів……..	52
1.2.4.	Станини, рами……	55
1.2.5.	Конструкція валків та формуючих елементів брикетних пресів……	58
1.2.6.	Механізми подачі та попереднього ущільнення шихти……..	62
1.2.7.	Пристрої для захисту валків від перевантажень……..	66
1.2.8.	Технічні рішення, що забезпечують контроль та регулювання режимів роботи валкових пресів……	71
1.3	Аналіз показників виробничої і технологічної ефективності валкових пресів і формування напрямків їх вдосконалення……	73
1.4	Аналіз досліджень щодо визначення раціональних силових технологічних та конструктивних параметрів валкових пресів……..	87
Висновки……		98
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗНОСУ БАНДАЖІВ ВАЛКОВИХ ПРЕСІВ НА ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ БРИКЕТУВАННЯ……...		100
2.1.	Аналіз і оцінка факторів, що визначають знос бандажів валків брикетних пресів……...	100
2.1.1.	Узагальнення інформації про конструкцію і досвід експлуатації валків брикетних пресів……	100
2.1.2.	Аналіз механізму зношування бандажів……	106
2.1.3.	Розробка концепції і системи досліджень впливу зносу бандажів на параметри процесу брикетування…….	109
2.2.	Формування вхідних даних необхідних для дослідження впливу зносу бандажів на параметри процесу брикетування……..	113
2.2.1.	Вибір характерних матеріалів, вивчення їх фізико-механічних властивостей і визначення опору стисненню……...	113
2.2.2.	Вибір конструктивних параметрів бандажів і формуючих елементів……...	121
2.2.3.	Аналіз контактних напружень на робочих поверхнях бандажів валкового преса…….	125

2.3. Дослідження впливу ступеня зносу бандажів валкових пресів на параметри брикетування…… 136
2.3.1. Розробка математичної моделі зносу бандажів……... 136
2.3.2. Розробка методу дослідження впливу зносу бандажів на параметри брикетування за допомогою топограм зносу…….. 142
2.3.3. Розрахунково-аналітичне визначення параметрів брикетування для зношених формуючих елементів…… 148
2.3.4. Встановлення взаємозв'язків між характеристиками зносу бандажів та параметрами брикетування……... 150
2.3.5. Експериментальні дослідження та порівняльний аналіз результатів розрахунково-аналітичних і експериментальних досліджень впливу зносу бандажів на параметри процесу брикетування…… 161
2.4. Розробка системного підходу для аналізу та оптимізації рішень, що забезпечують збільшення ресурсу експлуатації бандажів…… 170
2.4.1. Створення структури і алгоритму вибору раціональних режимів роботи бандажів, технологічних і технічних рішень для збільшення тривалості їх експлуатації…… 171
2.4.2. Випробування системного підходу при вирішенні завдань з прогнозування і збільшення ресурсу експлуатації бандажів... 180
2.4.3. Розробка експлуатаційної карти бандажів валкових брикетних пресів…… 204
Висновки…… 210
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ ВПЛИВУ КОНФІГУРАЦІЇ ФОРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ПРУЖНУ ПІСЛЯДІЮ В БРИКЕТАХ…… 212
3.1. Формування науково-методичного підходу до дослідження впливу конфігурації формуючих елементів на пружну післядію в брикетах…… 212
3.2. Експериментальні дослідження зв'язків параметрів ущільнення і пружної післядії з тиском пресування…… 218
3.2.1. Визначення параметрів ущільнення та пружної післядії для матеріалів з різними фізико-механічними властивостями……... 218
3.2.2. Встановлення графічних і аналітичних залежностей коефіцієнта ущільнення, пружної післядії та розущільнення від тиску пресування…… 224
3.3. Розрахунково-аналітичні дослідження зв'язків напружено-деформованого стану в брикетах з пружною післядією…… 231
3.3.1. Розробка методу оцінки впливу конфігурації формуючих елементів та параметрів ущільнення на пружну післядію……... 231
3.3.2. Застосування методу оцінки впливу конфігурації формуючих елементів на пружну післядію в брикетах до вирішення практичних завдань……..... 238
Висновки…….. 251

РОЗДІЛ 4. АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ПРЕСУВАННЯ В ВАЛКАХ НА ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ БРИКЕТУВАННЯ……. 253
Висновки…… 270
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКІВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ШНЕКОВОГО ПІДПРЕСОВНИКА ВАЛКОВОГО ПРЕСА ТА ПАРАМЕТРІВ БРИКЕТУВАННЯ……... 272
5.1. Математична модель для досліджень параметрів шнекового підпресовника валкового преса……..... 274
5.2. Дослідження зв’язків між параметрами шнекового підпресовника……..... 284
5.3. Промислове дослідження процесу брикетування на валковому пресі з використанням шнекового підпресовника……... 297
Висновки…… 300
РОЗДІЛ 6. РОЗВИТОК КОМПЛЕКСНОГО СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ДО ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ВАЛКОВОГО ПРЕССА З ВИКОРИСТАННЯМ ОСНОВНИХ ПОЛОЖЕНЬ ТЕОРІЇ ПРОЕКТУВАННЯ……..... 302
6.1. Розвиток системного підходу до створення раціонального компонувального рішення конструкції валкового преса…….. 302
6.2. Розробка комплексного методу визначення раціональної конфігурації пресуючих поверхонь валків……. 318
Висновки…… 335
РОЗДІЛ 7. РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ І БАЗОВИХ ВУЗЛІВ ВАЛКОВИХ ПРЕСІВ, ЩО ПРОЕКТУЮТЬСЯ ЗА МОДУЛЬНИМ ПРИНЦИПОМ…… 337
7.1. Досвід створення та промислового застосування валкових пресів конструкції ІЧМ…… 337
7.2. Конструктивні елементи преса вдосконаленої конструкції……. 340
7.2.1. Рама……... 340
7.2.2. Валки преса……..... 342
7.2.3. Гідравлічна система пристрою захисту валків від перевантаження……... 358
7.2.4. Шнековий підпресовник…… 364
7.3. Технічні рішення щодо вдосконалення валкових пресів…….. 369
Висновки…… 387
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……... 388
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….. 393
ДОДАТКИ…….. 418

ВСТУП

Актуальність роботи. В даний час все більшого розвитку набуває використання технологій брикетування дрібнофракційних сировинних матеріалів, що сприяють 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.

Серед сучасних іноземних спеціалістів, які займаються розробкою технологій та валкових пресів для брикетування слід виділити наступних науковців: M. Hryniewicz, M. Bembenek, R.T. Dec, R.K. Komarek, A. Zavaliangos, Ю.Н. Логінов, Н.А. Бабайлов.

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.

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 і агрегатів, активно застосовуються системи автоматизованого проектування (САПР), наприклад, SolidWorks, Компас і Autodesk Inventor та т.п. При створенні валкового преса наявність стандартного набору засобів САПР є необхідною, але не достатньою умовою, тому що не дозволяє приймати науково-обгрунтовані 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 роботи і завдання дослідження. Мета роботи полягає у науковому обґрунтуванні та розробці комплексу нових методів визначення раціональних конструктивних параметрів елементів валкових пресів, запроектованих за

модульним принципом, що забезпечує вирішення важливої науково-технічної проблеми – створення сучасного пресового обладнання для брикетування дрібнофракційної сировини для різних галузей промисловості.

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 технологічні і енергосилові параметри брикетування;
- розробити метод оцінки впливу конфігурації формуючих елементів валкового преса на пружну післядію в брикетах;
- встановити вплив швидкості деформації на параметри ущільнення дрібнойфракційних 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 вдосконалену конструкцію валкового преса та його окремих деталей та вузлів.

Об’єкт дослідження – процес визначення раціональних конструктивних та експлуатаційних параметрів валкових пресів.

Предмет дослідження – взаємозв’язки між конструктивними параметрами пресового обладнання, зносом робочих поверхонь 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 енергосилові та технологічні параметри 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. 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:

- вдосконалених деталей та вузлів дослідно-промислового валкового преса, пресів високої продуктивності та пресів для брикетування енергетичних матеріалів з малою насипною щільністю (ДП «Дослідно-виробниче підприємство Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України);
- технології виробництва ущільненого продукту з дрібнофракційних та пиловидних залізовмісних вторинних матеріалів (ПАО «ММК Ілліча», ПАО «Азовсталь»);
- 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 (ТОВ «Біогумос»);
- валкового пресу та технології брикетування мінеральної сировини (ТОВ «Квадрат»).

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. В роботах виконаних у співавторстві здобувачу належить наступне. Наведені в дисертації теоретичні дослідження, розробка методик, обробка результатів експериментальних досліджень, узагальнення та аналіз отриманих результатів виконані автором самостійно.

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: 19 статей в спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ДАК України, 13 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 Sciences.

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

Дисертація являє собою узагальнення наукових результатів, по-отриманих автором при виконанні науково-дослідних робіт в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України в період з 2008 по 2021 роки.

Висловлюю щиру подяку всім своїм колегам з групи розробки технологій та обладнання для підготовки шихтових матеріалів відділу технологічного обладнання і систем управління ІЧМ НАН України за допомогу у виконанні експериментальних та теоретичних досліджень, за їх професіоналізм та підтримку.

Відзначаю дружню допомогу в отримані практичних даних, плідну співпрацю, цінні поради, зауваження та рекомендації спеціалістів виробництва, завдяки яким, результати роботи мають практичну реалізацію на діючих підприємствах.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРАКТИЧНОГО ДОСВІДУ СТВОРЕННЯ СУЧАСНИХ ВАЛКОВИХ МАШИН ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ДРІБНОФРАКЦІЙНИХ СИРОВИННИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Загальна класифікація валкових пресів та межі їх застосування

Аналіз доступних джерел інформації [1-20] вказує на те, що для валкових пресів не існує узагальненої систематизованої їх класифікації за конструктивним виконанням та межами застосування. Є лише розрізненні класифікації за окремими ознаками. Але навіть для них часто немає чітко окреслених меж, за якими та, або інша конструкція пресу відноситься до відповідної категорії класифікації. Лише в Інституті чорної металургії НАН України запропонована узагальнена класифікація валкових пресів за технологічними та конструктивними параметрами (рис. 1.1). Згідно запропонованої класифікації пресове обладнання для переробки дрібнофракційних матеріалів можна виділити за рядом ознак.

1. Технологічний процес що здійснюється – брикетування, компактування, грануляція, дроблення. На рис. 1.2 представлений загальний вигляд продукції вказаних технологічних процесів.

Брикетування на сьогодні має три основних напрямки [21,22]:

Холодне брикетування без сполучного при високому тиску пресування реалізується в тих умовах, коли вихідний матеріал має таку молекулярну структуру, форму частинок та інші фізико-механічні властивості, що дозволяють отримувати міцний кусковий продукт в процесі пресування. Типовими прикладами таких матеріалі є значна кількість полімерних матеріалів у вигляді дрібних гранул, мінеральні матеріали з високим вмістом глинозему, негашене вапно CaO, каустичний магнезит MgO.

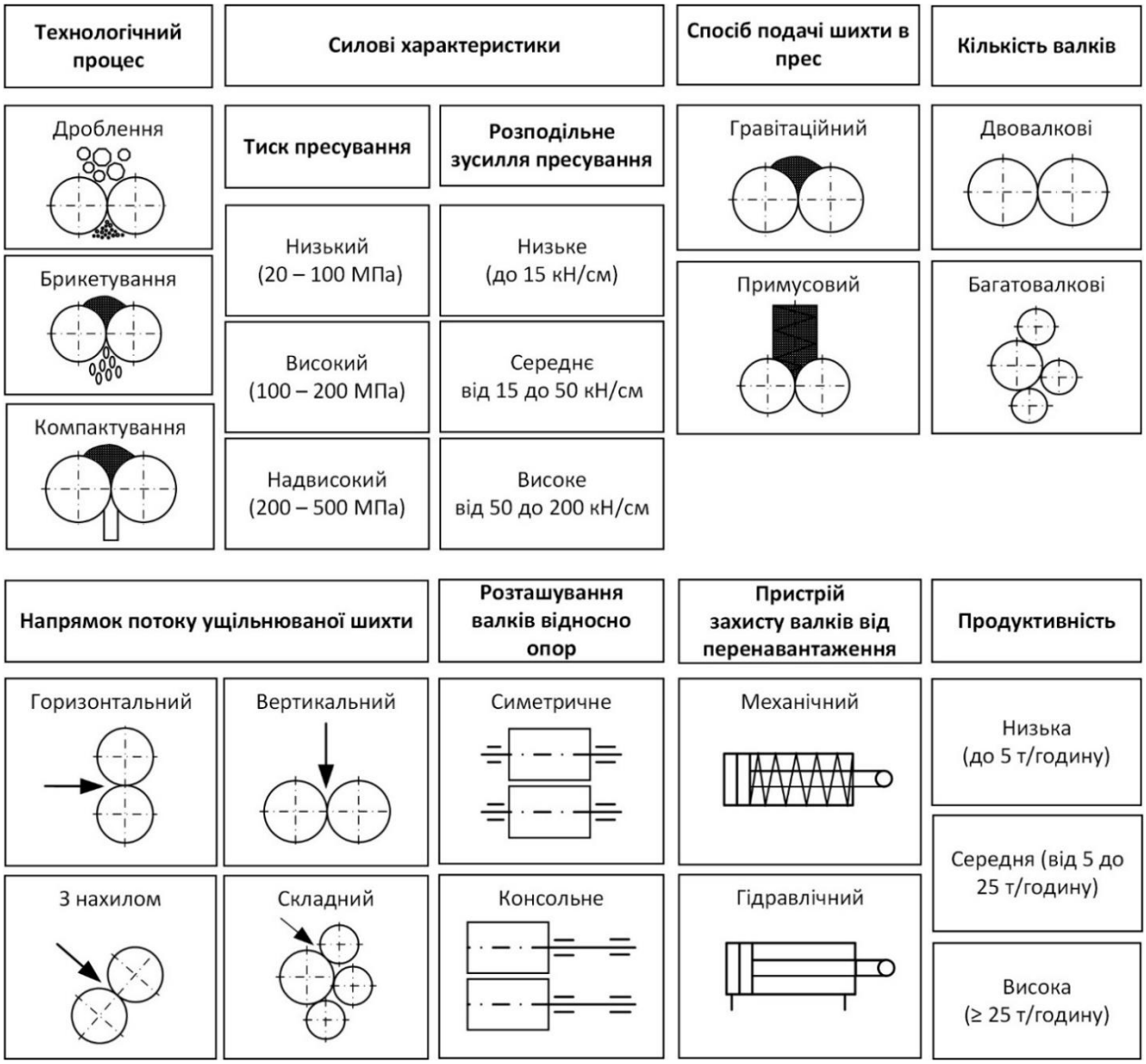


Рисунок 1.1 – Загальна класифікація валкових пресів за технологічними та конструктивними параметрами



Рисунок 1.2 – Продукція, що може бути отримана з використанням валкових пресів

а – брикети; б – компактований матеріал; в – подрібнений матеріал

*Холодне брикетування зі сполучним***,** як правило, реалізується у процесах брикетування при низьких та середніх значеннях тиску пресування (до 100 МПа). Але існують деякі специфічні матеріали та технології, виробництво якісних брикетів з яких може бути реалізовано тільки при умовах застосування сполучних речовин та високого тиску пресування (≥100 МПа). Такі матеріали не мають самі по собі необхідних сполучних властивостей та, як правило, є монофракційними з високою міцністю частинок. В цьому випадку потрібно додавання одного або комбінації сполучних та допоміжних речовин для надання шихті, яка брикетується, фізико-механічних властивостей, що дозволяють в процесі брикетування отримувати якісний кусковий продукт. До таких матеріалів, що брикетуються при високих значеннях тиску пресування, відносяться: флюси магнезіальні; флюоритовий концентрат з вмістом CaF_2≥90%, ільменітовий концентрат з вмістом TiO_2≥60%; хромітова руда и т.п.

Гаряче брикетування використовують в процесах, коли сполучні властивості вихідного матеріалу активуються в умовах високих температур: горячобрикетоване залізо (ГБЖ), конвертерний пил та Вельц-оксид цинку.

Компактування представляє собою процес ущільнення дрібнофракційних сипких матеріалів у валковому пресі з гладкими або профільованими валками, в процесі чого формується фігурна або пласка плитка. Отриманий таким способом компактний матеріал є проміжним продуктом, з якого шляхом дроблення та подальшого просіювання отримують гранули. Ця технологія найбільш поширена при виробництві однокомпонентних (KCI, SOP, AS) та складних добрив (NPK).

Дроблення/подрібнення мінеральної сировини із використанням валкових пресів представляє собою процес руйнування у міжвалковому просторі крупних фракцій мінеральної сировини, та дозволяє реалізувати спосіб об’ємного руйнування перероблюваного крупнокускового матеріалу. Це дозволяє при раціонально підібраному силовому впливі на перероблюваний матеріал значно зменшити питомі витрати енергії руйнування. Цей процес дозволяє одночасно реалізувати декілька стадій дроблення і подрібнення

сировини в одному технологічному агрегаті, що значно знижує витрати енергії на підготовку матеріалу. Управління параметрами процесу дезінтеграції в даній технології дозволяє досягнути заданої крупності дроблення та при необхідності уникнути переподрібнення. Дана технологія є найбільш поширеною при переробці клінкеру, шлаків, вугілля, вапняку і т. п.

2. За силовими показниками преси класифікуються двома способами.

Перший визначає тип пресу за величиною тиску пресування, а другий – за величиною зусилля пресування, що припадає на одиницю пресуючої поверхні валків.

За величиною тиску пресування класифікація брикетних пресів в різних інформаційних джерелах має ряд відмінностей, але в цілому вона наступна:

- преси низького і середнього тиску 20...100 МПа;
- преси високого тиску 100...200 МПа;
- брикетні преси надвисокого тиску 200...500 МПа.

*За розподільним зусиллям пресування***,** яке припадає на одиницю довжини робочої поверхні валків, класифікація виглядає таким чином (рис. 1.3):

- низького тиску – із розподільним зусиллям пресування до 15 кН/см (150 тс/м);
- середнього тиску з розподільним зусиллям пресування від 15 до 50 кН/см (від 150 до 500 тс/м);
- високого тиску з розподільним зусиллям пресування від 50 до 200 кН/см (≤2000 тс/м).

3. Спосіб подачі шихти в осередок деформації валкових пресів може бути:

Гравітаційний – як правило, використовується для матеріалів з насипною щільністю більшою за 0,6 г/см^3, до яких відноситься значна кількість металургійних дрібнофракційних та сипких матеріалів;

Примусовий (з використанням підпресовника) – використовується зазвичай для матеріалів з малою насипною щільністю (≤ 0,6 г/см^3), низькою сипкістю та з волокнистою структурою – лігнін, торф, буре вугілля, вугільні шлами, металургійний пил і т. п.

Тип преса	Зусилля на одиницю довжини пресуючої поверхні валків кН/см	Брикетування та компактування	Подрібнення
Високого тиску	150 140 120 100 80 60	Нікелевий порошок Ільменітовий та флюоритовий концентрати Мінеральні руди Вапно негашене Алюмінієва стружка Губчасте залізо Комплексні азотно-фосфорно-калійні добрива (NPK) Каустичний магнезит MgO Сульфат амонію Поварена сіль Сода FGD гіпс	Руди Цементний клінкер
Середнього тиску	40 20	Мідний концентрат Прокатна окалина Хромітова руда Каолін Малеїновий ангідрид	Вугілля
Малого тиску	10 0	Вугілля із сполучним	

Рисунок 1.3 – Класифікація валкових пресів за матеріалами, що переробляються та питомим зусиллям пресування

4. За кількістю валків преси поділяють на:

Двовалкові – використовуються в технологіях з одностадійним процесом ущільнювання шихти при гравітаційній подачі шихти та при використовуванні підпресовника. На сьогодні вони є найбільш поширеним типом валкових пресів для окускування та дроблення промислової сировини.

Багатовалкові преси **–** не знайшли на сьогодні значного поширення завдяки складності конструкції та налагодження процесу виробництва якісних брикетів. Однак, не зважаючи на це, преси такого типу мають наступні переваги. Вони дозволять реалізовувати процес багатостадійного деформування матеріалів в одному технологічному агрегаті. При цьому в разі реалізації процесів брикетування та компактування матеріалів з малою насипною щільністю та ярко вираженими пружними властивостями можливе отримання якісного кускового продукту та зниження негативного впливу на його споживчі характеристики пружної післядії.

5. За напрямом потоку ущільнюваної шихти:

Горизонтальний – при реалізації такого напряму пресування осі валків преса розташовані у вертикальній площині. Такий напрям потоку ущільнюваної шихти має перевагу в тому, що просипання дрібнофракційного матеріалу в зазор між валками виключається. Таким чином, з’являється можливість брикетування матеріалів близьких до пилоподібного стану (фракція ≤1,0 мм) з підвищеною текучістю та при малій швидкості деформації. Такий напрямом потоку шихти реалізується, як правило, в малотоннажних пресах з консольним розташуванням валків та оснащених шнековим підпресовником.

Вертикальний – найбільш поширений варіант, який використовується, як при гравітаційній подачі матеріалу, так і в разі застосування підпресовника. Осі валків пресу в даному разі розташовані в горизонтальній площині. При такому напрямі потоку ущільнюваної шихти забезпечується рівномірний підпор шихти на обидва валка, а також оптимальні умови захоплення та силового впливу з боку валків на матеріал.

З нахилом – використовується в умовах, коли потрібно забезпечити достатній підпор матеріалу в осередку деформації. При цьому, для матеріалів з підвищеною текучістю дозволяє зменшити на більшу величину значення швидкості деформації в порівнянні з горизонтальним потоком, при якому не відбувається просипу шихти у міжвалковий простір. Зазвичай нахил складає 30…60°. Але незважаючи на технологічні переваги такого способу реалізації процесу пресування, він не знайшов широкого розповсюдження. Це пов'язано з тим, що при реалізації даного способу дещо ускладнюється конструкція преса, що призводить до підвищення вартості його виготовлення та обслуговування.

Складний – реалізується у багатовалкових системах, які здійснюють процес багатостадійного пресування. Цей спосіб не знайшов широкого застосування, але є доволі перспективним, так як дозволяє досягати високих значень деформації матеріалу та в процесах брикетування і компактування дає можливість зменшити вплив пружної післядії на якість готової продукції за рахунок постадійного ущільнення з чередуванням стадій пресування та релаксації.

6. За розташуванням валків відносно підшипникових опор виділяють преси консольні та з симетричним положенням валків [23,24].

Преси з консольним розташуванням валків зазвичай мають невелику ширину пресуючих поверхонь, приблизно, від 50 мм до 200 мм, та малу продуктивність (до 10 т/годину) [25-27]. При цьому такі преси оснащені підпресовниками та мають вертикальне розташування валків для реалізації горизонтального напряму потоку матеріалу, що пресується. Консольне розташування валків дозволяє виконувати зміну кільцевих бандажів або сегментів не демонтуючи валки. Це досить гарна перевага в умовах, коли є необхідність в частій та швидкій зміні калібрування пресуючих поверхонь.

Преси з симетричним розташуванням валків є найпоширеним конструктивним рішенням в валкових пресах. Таке розташування пресуючих поверхонь дозволяє більш рівномірно розподілити навантаження на підшипникові опори. При такому розташуванні діапазон робочої ширини валків становить, приблизно, від 50 мм до

1000 мм. Такі преси дозволяють досягнути більш високої продуктивності в порівнянні з консольними (приблизно до 50 т/годину).

7. За типом захисту валків від перенавантаження відрізняють преси з механічним [28] та гідравлічним пристроєм [29,30].

Як правило, механічними пристроями для захисту валків від перенавантаження оснащуються валкові преси малого та середнього тиску пресування (тиск пресування до 100 МПа, або з розподільним зусиллям пресування до 50 кН/см). При цьому загальне зусилля пресування таких пресів не перевищує 2000 кН.

Гідравлічними пристроями для захисту валків від перенавантаження оснащаються преси високого тиску (≥100 кН, або з розподільним зусиллям пресування ≥50 кН/см). Зусилля пресування таких пресів ≥2000 кН.

8. За продуктивністю валкові преси розділяють на три основні групи: низької – до 5 т/годину; середньої – від 5 до 25 т/годину; високої – понад 25 т/годину.

Найбільш поширені на підприємствах гірничо-металургійного комплексу преси середньої та високої продуктивності.

1.2. Узагальнення та аналіз основних технічних та конструктивних рішень вузлів і механізмів валкових пресів

1.2.1. Огляд сучасних валкових пресів для переробки сировинних матеріалів

Серед зарубіжних підприємств, що спеціалізуються в області розробок і виробництва валкових пресів, можна виділити ряд фірм.

«K. R. Komarek Inc» (США) [31] здійснює виготовлення декількох базових конструкцій валкових пресів продуктивністю до 54 т/годину. Відповідно до класифікації, прийнятої на даному підприємстві, вироблені їм валкові преси діляться на три категорії - лабораторні, високого і середнього тиску пресування (рис. 1.4).

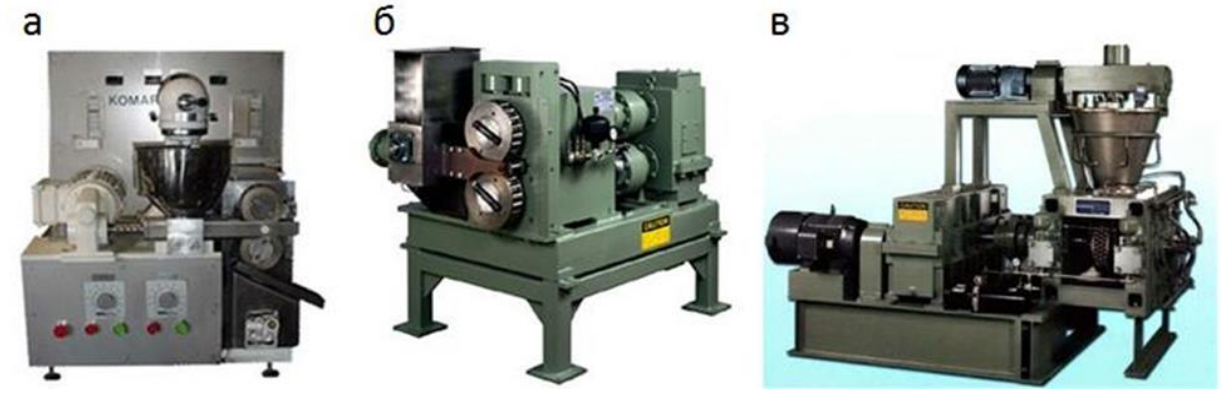


Рисунок 1.4 – Преси фірми «K.R.Komarek Inc.»:
а – лабораторний прес (модель DH500 - 28x2); б – прес високого тиску пресування (модель B220B); в – прес, розрахований на середні і високі значення тиску пресування (модель DH300).

Лабораторні валкові преси DH500 – 28x2, які вироблені цим підприємством, мають продуктивність до 25 кг/годину і є в даний час найбільш малогабаритними пресами валкового типу на світовому ринку. Ці машини застосовуються для дослідження процесів брикетування різноманітних сипучих матеріалів в лабораторних умовах. Основні робочі механізми, які беруть участь у взаємодії з матеріалом, який брикетується, виконані з нержавіючих сталей, валки мають консольне розташування по відношенню до станини. Прес оснащений змішувачем і шнековим механізмом подачі шихти в валки. Максимальний розмір брикету 34x18x12 мм. Діаметр і довжина робочих поверхонь валків, відповідно – 100 мм і 38 мм. Максимальне зусилля пресування – до 50 кН. Преси оснащені системою для збору і обробки даних, що характеризують параметри брикетування.

Моделі пресів серії «B» (рис. 1.4 б) розроблені для умов пресування дрібнофракційних матеріалів при високих значеннях тиску пресування із забезпеченням швидкої заміни валків. Зазвичай моделі B220B і B400B серії «B» застосовують для пресування неорганічних речовин, наприклад, негашеного вапна, металевих порошків. Відмінною конструктивною особливістю цих пресів

є консольне кріплення валків, що забезпечує швидку заміну кільцевих бандажів з виконаними на їх робочих поверхнях формуючими елементами. Продуктивність цих пресів складає від 115 кг/годину до 9 т/годину.

Моделі пресів серії «DH» (рис. 1.4 в) призначені для роботи в широкому діапазоні значень тиску пресування, що дозволяє виконувати оптимізацію технологічного режиму брикетування з урахуванням фізико-механічних властивостей шихти. У моделях пресів DH300, DH400, DH450, DH500, DH500-WS і DH500-28x2 серії «DH», на відміну від серії «B», валки мають дві підшипникові опори розташовані симетрично щодо робочої частини валка. Залежно від технології і необхідної продуктивності, преси оснащуються валками з різною шириною поверхонь пресування. Ці преси застосовуються для брикетування широкого спектру матеріалів – різних видів вугілля, оксидів металів, хімічних речовин, рудних матеріалів. Валки пресів виконуються як цілісні, так і зі знімними пресуючими сегментами. Подача шихти в міжвалковий простір вертикальна, при цьому вона може здійснюватися за допомогою подаючого шнека або гравітаційно за рахунок власної ваги шихти.

«Hosokawa Bepex GmbH» (Німеччина) [32-35] виробляє три базові серії L, K і MS валкових пресів продуктивністю від 100 кг/годину до 100 т/годину.

Серія L (рис. 1.5) являє собою валкові преси надмалої продуктивності (від 20 до 150 кг/годину), призначені для лабораторних досліджень і брикетування малих партій матеріалів з різними фізико-механічними властивостями.

Валкові преси серії K (рис. 1.5 б) мають продуктивність від 0,1 до 1,5 т/годину і розроблені спеціально для застосування в хімічній і фармацевтичній промисловості, для процесів брикетування в яких передбачається часта зміна шихт, що брикетуються.

Преси серії MS (рис. 1.5 в) розроблені для брикетування широкої номенклатури матеріалів в хімічній, гірничодобувній і металургійній промисловості, в тому числі для процесів гарячого брикетування. Модельний ряд пресів серії MS дозволяє забезпечувати продуктивність до 150 т/годину. Це універсальні валкові машини, призначені для роботи у важких умовах, які

оснащуються різними типами шнекових пристроїв для подачі матеріалу в осередок деформації. Діаметр і ширина робочих поверхонь валків, розміри і конфігурація формуючих елементів оптимізуються з урахуванням властивостей матеріалу, що брикетується та вимог до брикетів.

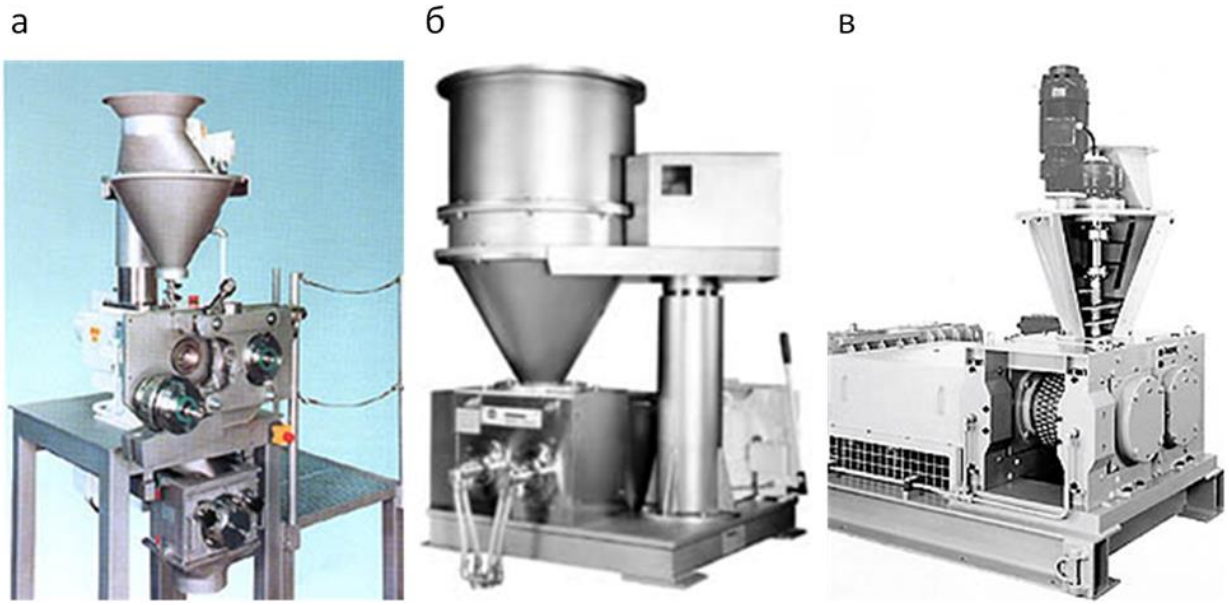


Рисунок 1.5 – Валкові преси фірми «Hosokawa Bepex GmbH»
а – серія L; б – серія K; в – серія MS

Валковий вузол оснащений гідравлічною системою захисту валків від перевантажень, який включає елементи контролю зусилля пресування, з'єднані за допомогою датчиків з електричною схемою управління пресом. Валки пресів виконуються складовими зі змінними кільцевими бандажами або сегментами. В якості матеріалів для виготовлення використовується широкий спектр металів і сплавів, які вибираються з урахуванням конкретних технологічних умов. На цих машинах можна отримувати, як гранульований матеріал, так і брикети заданих розмірів і форми. Відмінною особливістю цих пресів є те, що вони розраховані, в основному, на здійснення процесу ущільнення матеріалів без додавання вологи і використання сполучних речовин. Габаритний розмір одержуваних брикетів знаходиться в межах 12...300 мм.

«Maschinenfabrik Köppern GmbH & Co. KG » (Німеччина) [36] виробляє валкові преси для гарячого і холодного брикетування (рис. 1.6) продуктивністю від 4 до 80 т/годину. Преси дозволяють отримувати брикети подушкоподібної форми об'ємом від 1,5 до 220 $см^3$, розмірами від 19х16х9 мм до 92х69х65 мм. Конструкція валків пресів дозволяє сприймати навантаження до 140 кН на сантиметр ширини робочої поверхні валка. Такий показник здатності до навантаження не є стандартним і прийнятий лише низкою підприємств, що виготовляють валкові преси. Залежно від необхідних технологічних параметрів та навантаження що сприймається пресом, вони оснащуються валками з кільцевими бандажами або сегментами. Діаметр валків залежить від конструктивного виконання преса і знаходиться в діапазоні 300...1400 мм, при цьому значення максимального зусилля пресування, в залежності від моделі преса, становить від 400 кН (маса преса дорівнює 2 т) до 7600 кН (маса – 400 т). Притиск валків здійснюється гідравлічною системою, з її ж допомогою виконується контроль величини зусилля пресування. При необхідності преси оснащуються шнековими підпресовниками.

В опорах валків застосовані сферичні роликопідшипники. Крім радіальних навантажень, такі підшипники здатні витримувати осьові навантаження, що діють в обох напрямках, що робить їх нечутливими до перекосу валу під час роботи преса. Один валок жорстко фіксується в рамі преса, а положення другого валка регулюється за допомогою гідропневматичною системи.

На рамі преса встановлені «плаваючий» і «нерухомий» валки, гідравлічні циліндри і корпус преса. Преси можуть оснащуватися монолітними, бандажованими, або валками зі знімними сегментами. Вибір залежить від оброблюваного продукту. Матеріали для виготовлення валків вибираються з урахуванням властивостей шихти, яка брикетується, та особливостей технологічного процесу отримання брикетів.

а б



Рисунок 1.6 – Валкові преси фірми «Maschinenfabrik Köppern GmbH & Co. KG»
а – для гарячого брикетування; б – для холодного брикетування

Для брикетування абразивних матеріалів підприємство пропонує валки зі спеціальними композитними зносостійкими покриттями, які забезпечують максимальний термін служби валків, також передбачається можливість відновлення зношеної поверхні валка і повторне його використання. Залежно від характеристик сипучості (текучості) оброблюваної шихти і її здатності до заповнення формуючих елементів преса, подача матеріалу в осередок деформації здійснюється за допомогою шнекового підпресовника або завантажувального пристрою з гравітаційною подачею.

«Sahut-Conreur» (Франція) [37] виробляє валкові преси для брикетування і грануляції (рис. 1.7). Розміри пресів, які виробляються цим підприємством, визначаються габаритними розмірами валків, діаметри яких знаходяться в межах від 150 до 1400 мм, ширина робочої поверхні валка – від 30 до 1600 мм.

Конструкція вузлів і механізмів преса допускає зміну робочого навантаження в межах від 1 до 150 кН на сантиметр ширини робочої поверхні валка. У складі преса передбачені пристрої для плавного регулювання частоти обертання валків до 25хв$^{-1}$,

яка при необхідності може бути збільшена. Валки можуть виготовлятися в двох конструктивних виконаннях, з кільцевими бандажами і з сегментами. Система притиску та захисту валків від перевантажень гідравлічна. При необхідності преси оснащуються підпресовниками шнекового типу. Приводи пресів оснащуються редукторами з двома роздатковими валами. У складі приводу пресів можливе застосування як електродвигуна, так і гідромотора.

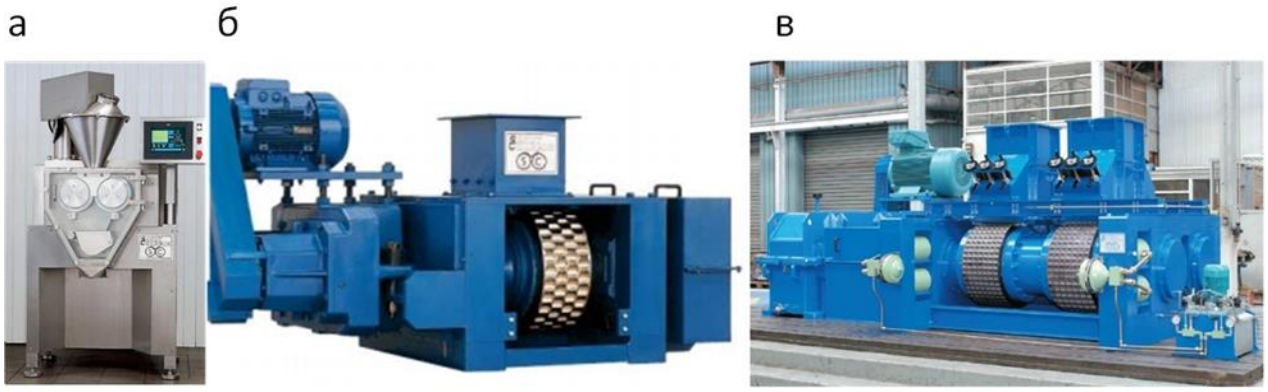


Рисунок 1.7 – Валкові преси фірми «Sahut-Conreur»
а – для фармацевтичної промисловості та лабораторій; б – для брикетування вугілля, шламів та інших матеріалів, які не потребують великих зусиль пресування; в – зі збільшеними продуктивністю і зусиллям пресування для брикетування широкого спектру матеріалів

Підприємство ЗАТ «НВО Спайдермаш» [38] виготовляє валкові брикетні преси продуктивністю від 1 до 54 т/годину з частотою обертання валків 3...10 хв$^{-1}$ і зусиллям пресування від 1000 до 4000 кН (рис. 1.8). Механізм притиску валків може бути як гідравлічний, так і механічний. Деякі моделі пресів оснащені підпресовниками.

Відомий ряд Китайських виробників валкових пресів для брикетування. Найбільш відомі з них «ABC Machinery (Anyang Best Complete Machinery Engineering Co., Ltd)» [39], Luoyang Zhongyuan Mining Machine Manufacture Co., Ltd. [40] і Anyang GEMCO Energy Machinery Co., Ltd [41]. Ці підприємства випускають валкові преси продуктивністю від 1 т/годину до 50 т/годину, при

відповідному діапазоні потужностей приводу преса від 5,5 кВт до 350 кВт. Притиск валків механічний або гідравлічний залежно від моделі преса. Валки преса оснащуються кільцевими бандажами, які виготовляються з марганцевиих і хромомарганцевих сталей. Формуючі елементи на робочих поверхнях валків виконуються у вигляді симетричних півформ. Частота обертання валків, в залежності від моделі преса 10...18 хв$^{-1}$. Незважаючи на низьку ціну, в порівнянні з провідними світовими виробниками валкових пресів, машини виробництва даного підприємства характеризуються низькою якістю виготовлення і сервісного обслуговування.

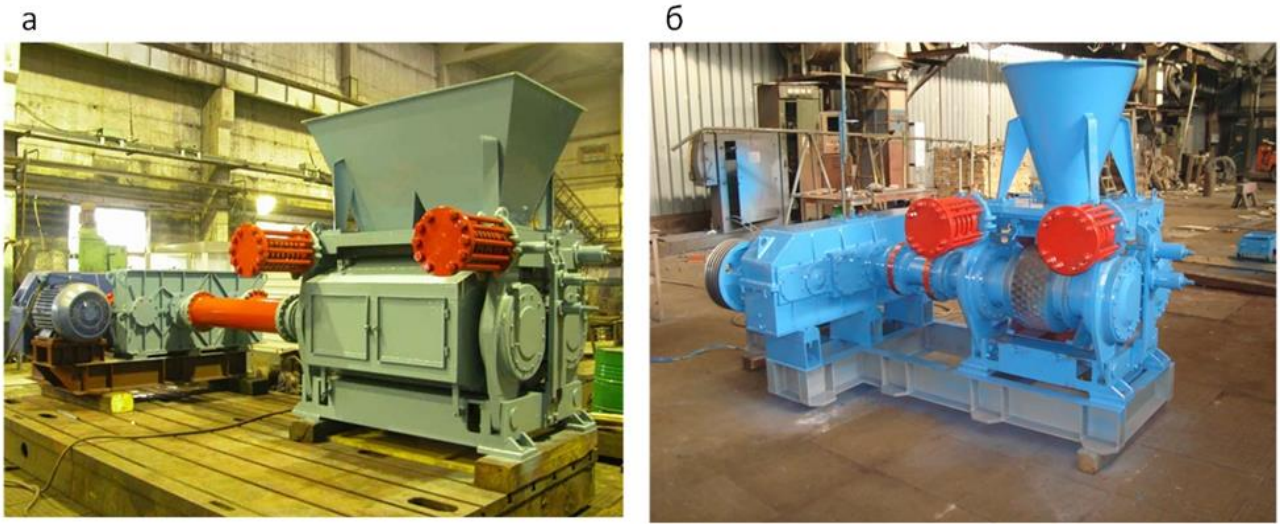


Рисунок 1.8 – Валкові преси ЗАТ «Спайдермаш»
а – без підпресовника (модель БПВ 700 / 800-200);
б – з підпресовником (модель БПВ 400 / 200-100)

Огляд моделей валкових пресів для брикетування, що випускаються різними виробниками показує, що зростання обсягу виробництва брикетів і залучення в переробку методом брикетування нових видів дрібнофракційних шихт призводить до розширення параметричного ряду машин даного типу.

Формування технічних характеристик і модельного ряду валкових пресів визначається властивостями і номенклатурою матеріалів що брикетуються,

вимогами до брикетів (розмір, форма, щільність, міцність і т.п.), заданою продуктивністю, вимогами до стабільності технологічного процесу брикетування, надійності і ресурсу експлуатації пресового обладнання.

Основним недоліком розглянутих вище відомих конструкцій пресів для брикетування є їх висока металоємність, викликана перш за все конструктивними особливостями станини. Пояснюється це тим, що конструкція валкового блоку, яка сприймає технологічне навантаження у вигляді розпірного зусилля при стисненні дрібнофракційної шихти, як правило, виконується у вигляді станини або масивної складної рами замкнутої конструкції, яка охоплює опори валків та має певний запас міцності і жорсткості. Привод валків часто має масивні проміжні вали. Все це призводить до підвищеної металоємності преса. Так, демонтаж валків зі станини відкритого типу, який здійснюється витяганням їх вгору, вимагає великої кількості операцій по зніманню кришки станини і завантажувального пристрою, від'єднання комунікацій і т. д. Демонтаж валків в пресах із станиною закритого типу здійснюється ще складніше. Заміна валків в разі їх зносу або поломки пов'язана з трудомісткими операціями по їх вилученню з преса і, відповідно, з їх встановлення, що негативно позначається на показниках ефективності використання і обслуговування обладнання.

Незважаючи на те, що рядом зарубіжних підприємств проектуються і випускаються різні модифікації валкових пресів, їх придбання та впровадження для багатьох вітчизняних підприємств викликає труднощі. Вартість такого обладнання, а також витрати на його ремонт і експлуатацію великі. Як показує досвід, конструктивні і технологічні параметри преса, конфігурацію і розміри формуючих елементів необхідно вибирати з урахуванням властивостей матеріалу що брикетується. При цьому необхідна розробка та освоєння в умовах діючого підприємства технології брикетування та режимів роботи пресового обладнання з урахуванням технологічних особливостей отримання брикетів і їх подальшого промислового використання. Тому, актуальним є розробка та впровадження ефективного вітчизняного пресового обладнання для брикетування.

1.2.2. Особливості конструкцій валкових пресів ІЧМ

Преси конструкції ІЧМ розроблені на базі сформованого системного підходу до створення технологій і пресового обладнання для брикетування, який включає наступні стадії (рис. 1.9):

- вивчення фізико-механічних властивостей вхідного дрібнофракційного матеріалу (насипної щільності, гранулометричного складу, опору шихти стисненню, коефіцієнтів тертя і т. д.);
- відпрацювання і вибір раціональних режимів брикетування заданого матеріалу в умовах лабораторної бази Інституту, створення технологічного регламенту отримання брикетів;
- розрахунково-аналітичні дослідження енергосилових параметрів брикетування;
- визначення раціонального компонувального рішення і параметрів основних елементів преса, формування конструкторської документації;
- виготовлення преса;
- освоєння технології і обладнання в умовах діючого виробництва.

Розробка всіх моделей валкових пресів конструкції ІЧМ заснована на наступних принципах [1]:

1. Простота і надійність конструкції.
2. Компактність, ремонтопридатність, зручність монтажу, експлуатації та технічного обслуговування.
3. Регулювання продуктивності преса.
4. Уніфікація вузлів і деталей.
5. Мінімальні габарити і металоємність.
6. Забезпечення регульованої подачі шихти на валки з метою отримання брикетів необхідної щільності і міцності.
7. Можливість настройки преса на задане зусилля пресування і захисту від перевантажень.
8. Технологічність виготовлення, складання та монтажу деталей і вузлів преса.

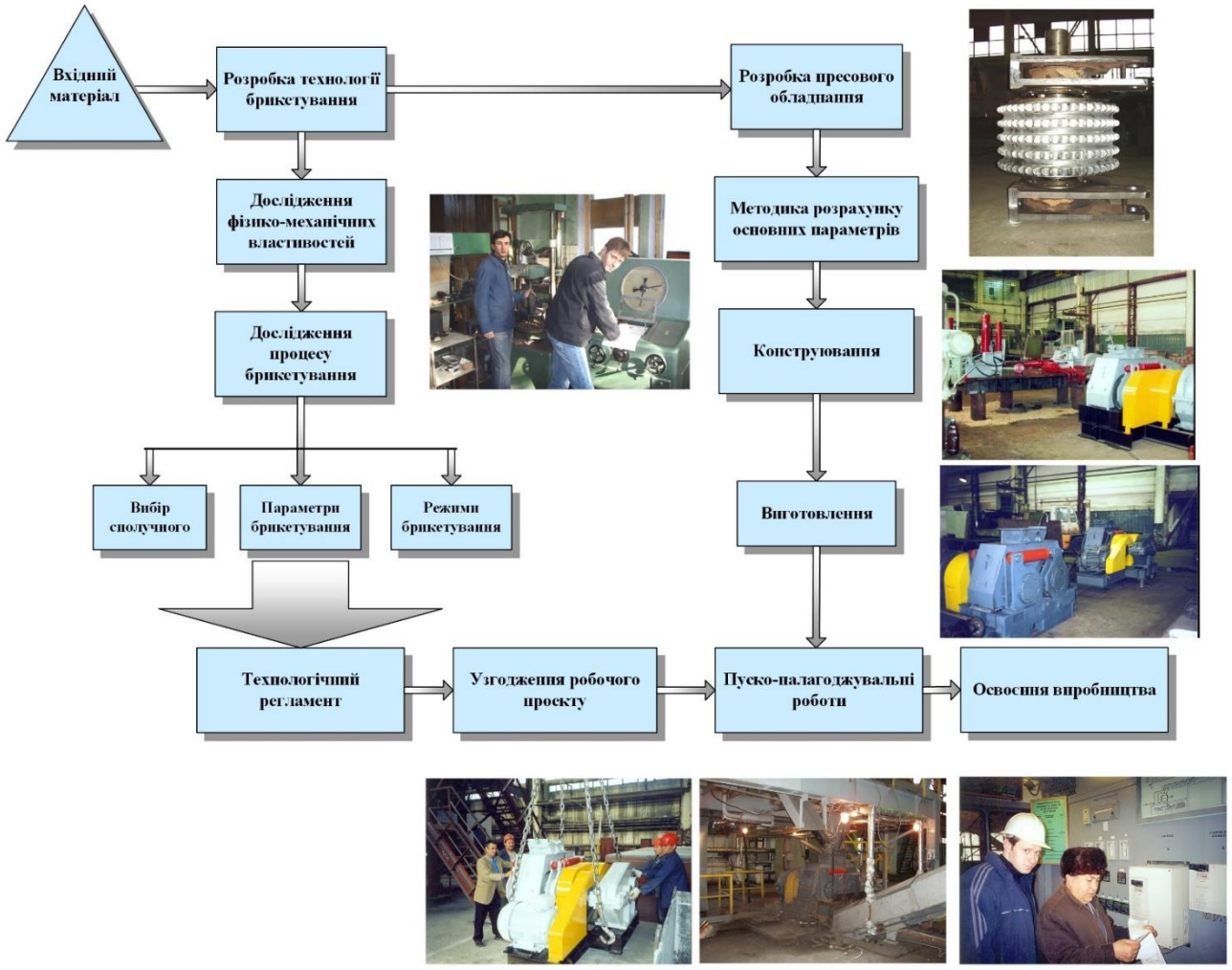


Рисунок 1.9 – Структура системного підходу ІЧМ до створення технологій і обладнання для брикетування

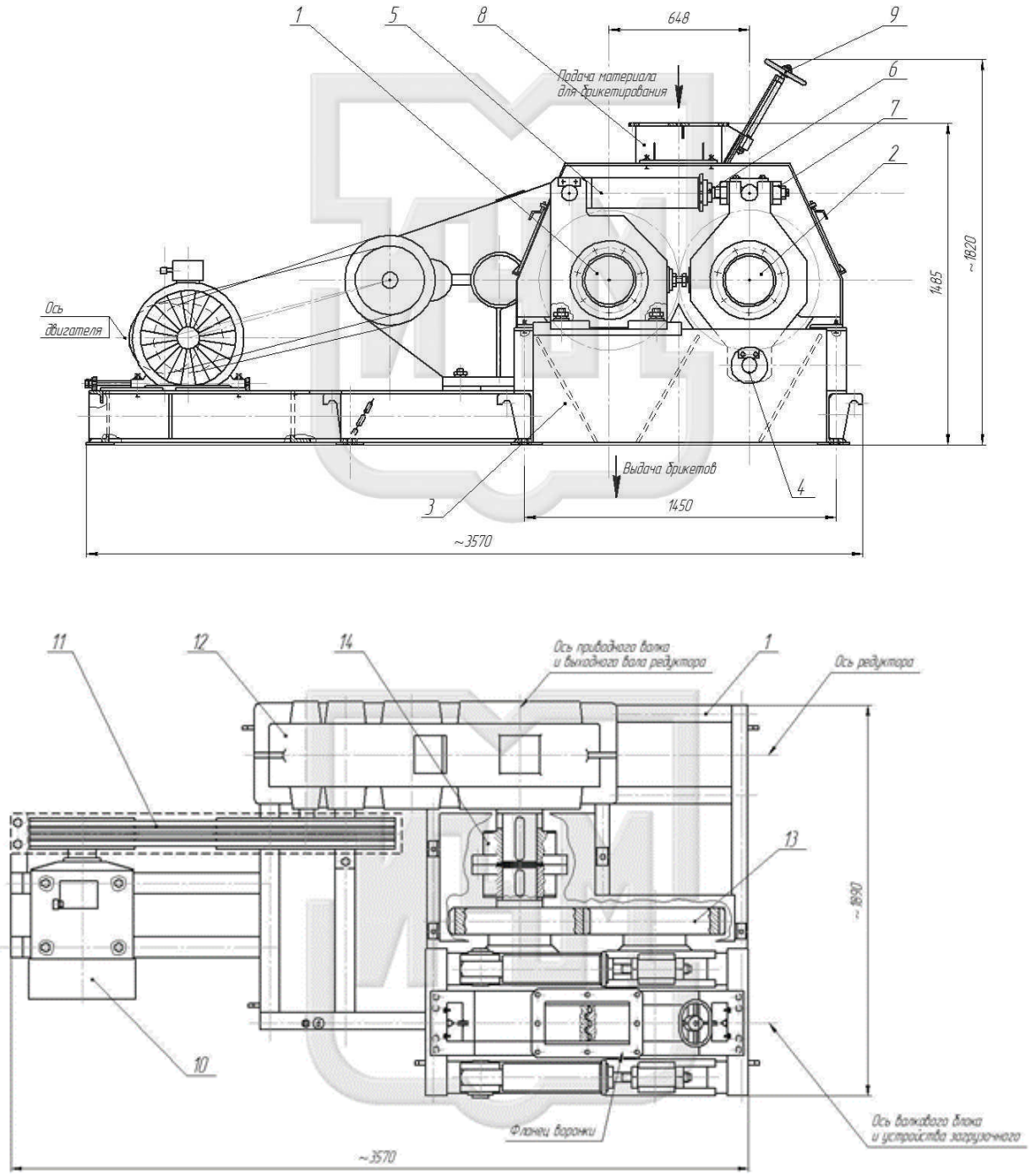


Рисунок 1.10 – Принципова схема валкових пресів конструкції ІЧМ

1 – валок приводний; 2 – валок ведений; 3 – рама; 4 – вісь рухомої валкової опори; 5 – пристрій для захисту валків від перенавантаження; 6 – регулювальний пристрій; 7 – пристрій регулювання зазору між валками; 8 – завантажувальний пристрій; 9 – шибер; 10 – електродвигун; 11 – клиноремінна передача; 12 – редуктор; 13 – зубчаста синхронізуюча передача; 14 – муфта

а б



Рисунок 1.11 – Валкові преси конструкції ІЧМ

а – модель 19 з механічним прижимом валків і зусиллям пресування до 1200 кН;

б – модель 22 с гидравлічним прижимом валків і зусилям пресування до 2000кН

В результаті розвитку напрямку зі створення обладнання для холодного брикетування в ІЧМ був розроблений модельний ряд валкових пресів, про які вже йшлося в даному розділі роботи, вони впроваджені на виробництві та показали свою надійність та ефективність. На рис. 1.10 представлена принципова схема валкового преса конструкції ІЧМ, та на рис 1.11 загальний вигляд двох типових модифікацій.

а б

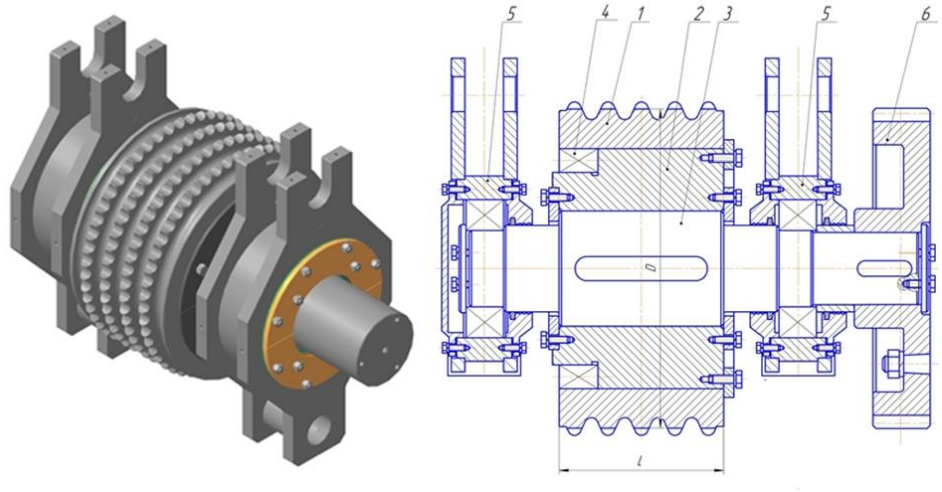


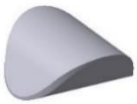
Рисунок 1.12 – Валок преса конструкції ІЧМ

а – зовнішній вигляд; б – принципове конструктивне рішення;

1 – змінний профільований бандаж; 2 – ступиця; 3 – валок; 4 – кріпильний елемент; 5 – підшипникові опори; 6 – зубчасте колесо синхронізуючої передачі

Однією з конструктивних переваг валкових пресів, створюваних в ІЧМ, є відсутність класичної станини, що забезпечує меншу металоємність, компактність, зручність вилучення валків при монтажі і ремонтах, технологічність виготовлення, складання деталей та вузлів преса. Преси оснащуються бандажованими валками (рис. 1.12) з формуючими елементами трьох основних типорозмірів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Форма та основні розміри брикетів

Форма	Тип формуючого елементу	Розміри, мм	Об’єм, $см^3$
«Пельменеподібна» 	R14	32,0x30,0x15,0	10...11
	R17	40,0x38,5x18,5	19...20
	R30	63,6x60,0x27,0	48...50

В якості матеріалу для виготовлення бандажів використовуються леговані стали, які дозволяють після термообробки забезпечити твердість 58...62HRC, підвищену міцність і стійкість до абразивного зносу.

Валки з’єднані між собою за допомогою силових елементів пристрою для захисту преса від перевантажень – демпферів. Захисні пристрої забезпечують заданий силовий режим роботи преса і призначені для врівноваження розпірних зусиль, що виникають між валками в процесі брикетування шихти, і здійснення розмикання валків при силовому перевантаженні преса.

У валкових брикетних пресах, як правило, пристрої для захисту від перевантажень встановлюють на лінії центрів валків, що відповідає положенню сприйняття реального навантаження на валки. З конструктивних міркувань встановлювати захисні пристрої на лінії центрів валків є найбільш зручним та логічним з точки зору його налаштування на задане зусилля пресування. Однак, встановлення захисного пристрою в зазначеному положенні не є кращим з точки зору збільшення його габаритних розмірів, викликаних підвищенням жорсткості пружних елементів, які сприймають зусилля пресування. У зв’язку з цим доцільним є встановлення захисних пристроїв на деякій відстані від лінії центрів валків, де навантаження на них буде істотно нижчим ніж реальне, яке виникає по лінії центрів валків. При цьому ступінь

зменшення навантаження буде визначатися відстанню віддалення від лінії центрів валків. Компонувальне рішення валкових пресів конструкції ІЧМ побудовано за таким принципом, який дозволяє розмістити демпфера захисного пристрою вище лінії центрів валків. Для цього один з валків пресу жорстко закріплений в рамі, а інший шарнірно, з можливістю відхилення від вертикальної осі при перевантаженнях. Це дає перевагу у порівнянні з валковими пресами інших розробників бо дозволяє знизити металоємність та навантаженість пристрою для захисту валків від перевантажень. Схематично таке конструктивне рішення представлено на рис. 1.13.

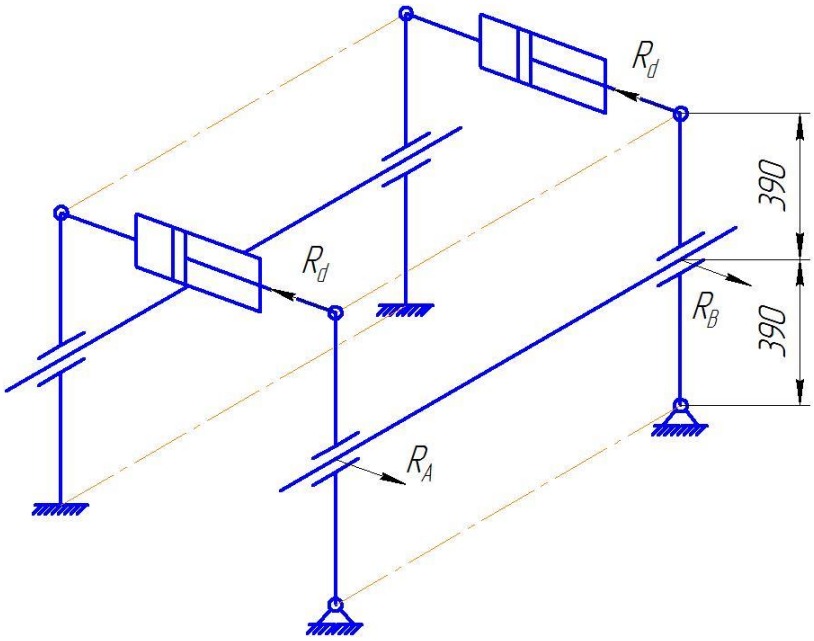


Рисунок 1.13 – Схема розміщення захисного пристрою блока преса ІЧМ

Досвід експлуатації валкових пресів, розроблених фахівцями ІЧМ, показав необхідність вдосконалення низки вузлів і механізмів преса. Одним з недоліків конструкції було використання в лінії приводу валків ланцюгової передачі, при цьому здійснювалося поетапне регулювання швидкості преса (3, 6, 8 хв$^{-1}$) шляхом заміни шестерень ланцюгової передачі. Як показала практика, на підприємствах з хорошим технічним рівнем для регулювання швидкості преса краще використовувати частотні перетворювачі. Наявність ланцюгової передачі обмежувало можливість збільшення силових характеристик преса. Розширення номенклатури брикетуємих шихт, ряд з яких характеризується підвищеним

опором стисненню, вимагало посилення лінії приводу. Тому постійно проводиться робота із вдосконалення преса при збереженні концепції його конструктивного рішення.

Застосовувані в валкових пресах, розроблених фахівцями ІЧМ, пружинні демпфери (рис. 1.14) в процесі експлуатації показали високу ступінь надійності.

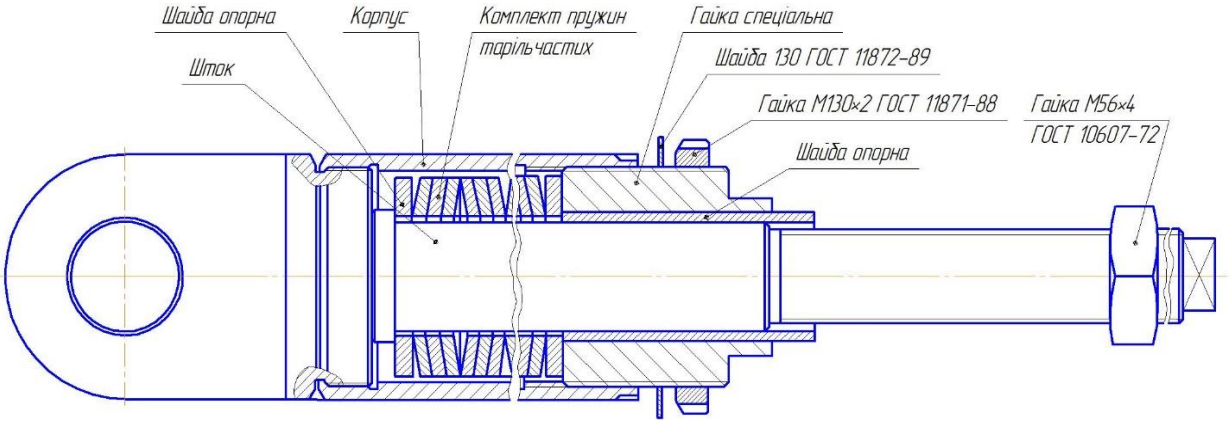


Рисунок 1.14 – Механічний захисний пристрій (демпфер) валкового преса ІЧМ

При затягуванні механічних демпферів преса необхідно забезпечити не тільки задану величину усадки пружин, а і її ідентичність для обох демпферів, що з'єднують валки. Нерівномірна початкова величина затягування пружин демпферу, особливо в разі нерівномірності подачі матеріалу в валки і його розподілу по ширині бочки, може привести до того, що демпфери будуть спрацьовувати по-різному. Це призведе до появи нештатних і небажаних навантажень в різних вузлах і елементах преса. Тому для забезпечення стабільних умов роботи преса при підвищених значеннях зусилля пресування (≥1000 кН) фахівцями Інституту були розроблені гідравлічні демпфери, що представляють собою гідроциліндри, тиск робочої рідини в яких забезпечує урівноваження розпірного зусилля між валками при брикетуванні. На рис. 1.15 представлена схема гідравлічної системи запобігання валків від перевантажень, розроблена спеціально для пресів конструкції ІЧМ.

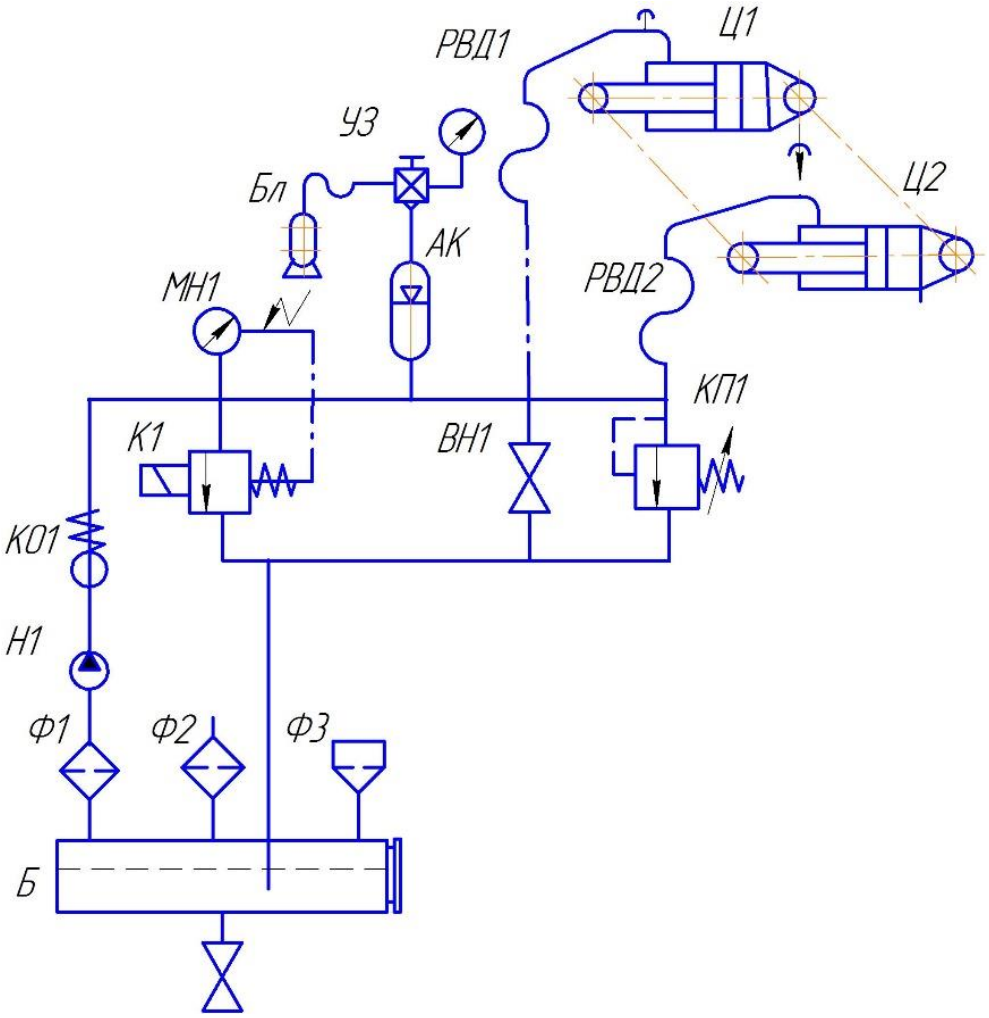


Рисунок 1.15 – Гідросистема валкового преса ІЧМ

Н1 – насос; Ц1, Ц2 – гідроциліндри (демпфера); АК – пневмо-гідроакумулятор; Бл – балон для заправки акумулятора азотом; МН1 – манометр; К1 – гідроклапан з електричної розвантаженням; Б – бак для зливу масла з гідросистеми Ф1, Ф2, Ф3 – фільтри; РВД1, РВД2 – рукава високого тиску

Дана гідравлічна система дозволяє в разі порушення режиму роботи преса і перевищенні заданої величини зусилля пресування здійснити відхід рухомого валка і відключення двигуна з метою зняття навантажень з несучих елементів преса. Налагодження та управління роботою гідравлічного демпфера здійснюються за допомогою розробленого компактного гідрообладнання. Тому деякі підприємства віддали перевагу поставці пресів з гідравлічними демпферами. Зокрема прес з гідравлічними демпферами експлуатується на

«Заводі по виробництву металургійних брикетів ТОВ Конкрет» (м. Кам'янське (Дніпродзержинськ), Україна). За цей час підтверджена надійність гідравлічних демпферів і простота їх обслуговування. Слід зазначити, що гідравлічні і пружинні демпфери з метою взаємозамінності виконані з однаковими габаритними і приєднувальними розмірами. Установка і заміна одного типу пристрою на інший не вимагає зміни конструкції преса.

Таким чином, валкові преси конструкції ІЧМ є достатньо сучасними, однак практика проектування та впровадження на виробництві дозволили сформулювати основні напрями їх подальшого вдосконалення:

- підвищення надійності і ефективності роботи преса за рахунок застосування і вдосконалення механічних і гідравлічних пристроїв для захисту валків від перевантажень, розробки нових ефективних способів кріплення бандажів і елементів приводу, використання сучасних пристроїв контролю і управління для регулювання роботи преса і захисту від перевантажень;
- розширення технологічних можливостей преса за рахунок застосування технічних рішень, що забезпечують збільшення продуктивності преса, використання пристроїв для розподілу і попереднього ущільнення брикетуємої шихти, що дозволить залучити до переробки широкого спектру матеріалів – від тих, що мають малу насипну щільність (0,3 г/см^3), до тих, які мають велику насипну щільність ($\geq$ 1,7 г/см^3);
- оптимізація енергосилових параметрів брикетування шляхом вибору раціональної схеми деформації та конфігурації формуючих елементів;
- збільшення ресурсу експлуатації швидкозношуваних елементів преса шляхом розробки нових типів формуючих елементів, раціональних режимів їх експлуатації на різних стадіях зносу і прийомів відновлення зношених пресуючих поверхонь;
- забезпечення умов отримання брикетів з заданими характеристиками за рахунок вибору оптимальних параметрів формуючих елементів бандажів з урахуванням властивостей матеріалів що брикетуються і вимог до брикетів.

1.2.3. Компонувальні рішення пресів

Відомі два типи розташування валків преса в підшипникових опорах – консольне і симетричне (рис. 1.16).

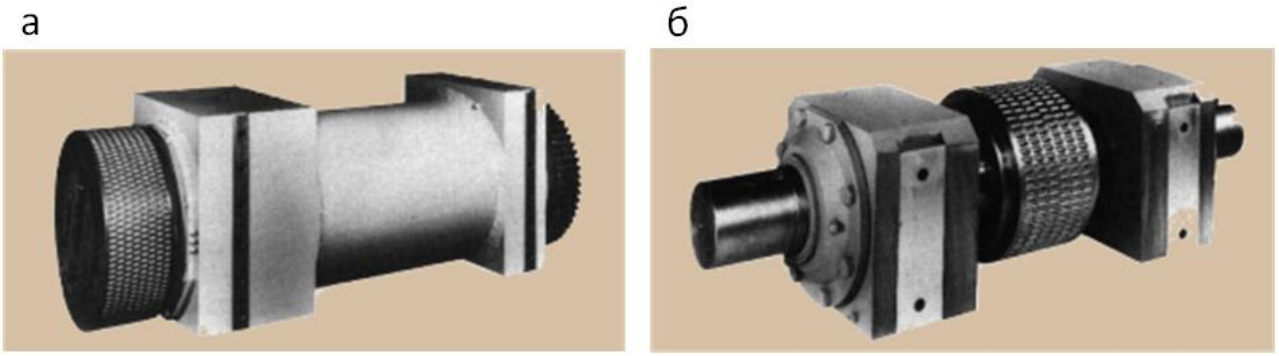


Рисунок 1.16 – Схеми розташування валків в підшипникових опорах
а – консольна; б – симетрична

Розташування валків в підшипникових опорах впливає на якість брикетів і роботу пресового обладнання [23,24]. Консольне розташування валків (рис. 1.16а), за твердженням фахівців фірми «Komarek Inc.» забезпечує більшу паралельність валків під впливом розпірного зусилля, що позитивно позначається на якості брикетів. Однак, в тексті публікації відсутні експериментальні дані, які підтверджують зазначений ефект. Консольне розташування валків істотно покращує умови технічного обслуговування преса, так як при заміні зношених бандажів не потрібно здійснювати демонтаж валкового блоку. У той же час, дана конструкція має ряд істотних недоліків, що обмежують її застосування. Ширина робочих поверхонь валків з консольним розташуванням обмежена виходячи з характеристик жорсткості несучих елементів преса, і як показує практика, вона не повинна перевищувати 1/3 діаметра пресуючої поверхні валка. Це, в свою чергу, обмежує кількість формуючих елементів на робочих поверхнях, що істотно знижує величину продуктивності що досягається. Консольне розташування валків потребує посилення підшипникових вузлів поблизу робочої поверхні (видно на рис. 1.16а), це обумовлено тим, що в даній опорі виникає значний вигинаючий момент від сили пресування.

Симетричне розташування опор валків (рис. 1.16б), в порівнянні з консольним, має істотну перевагу – велика жорсткість конструкції дозволяє збільшити тиск і зусилля пресування, а також підвищувати продуктивність преса за рахунок збільшення ширини робочої поверхні валка.

На рис. 1.17 представлені поширені компонувальні рішення валкових пресів для брикетування [11,12]. В компонувальному рішенні, представленому на рис. 1.17а, синхронізуюча передача розташовується зовні валкового блоку, така компоновка преса є найбільш поширеною.

Рішення, представлене на рис. 1.17б, з розташуванням синхронізуючої передачі всередині станини є менш вдалим, так як збільшується відстань між опорами валків, що вимагає збільшення діаметра шийок валків для збереження жорсткості конструкції.

При використанні в конструкції преса роздаткового редуктора застосовуються схеми компонування рис. 1.17в,г. Залежно від конструктивного виконання для з'єднання валків преса з хвостовиками редуктора застосовуються зубчасті муфти або шпинделі. Компонування зі шпинделями застосовується тоді, коли міжосьова відстань вихідних валів редуктора не збігається з міжосьовою відстанню валків преса. Перевагою використання роздаткового редуктора є висока ступінь надійності і довговічності у порівнянні з відкритою синхронізуючою передачею.

Дане компонувальне рішення не знаходить широкого розповсюдження з причин високої вартості роздаткового редуктора, збільшення габаритних розмірів та металоємності.

У конструкціях пресів, що працюють з великими номінальними зусиллями і моментами пресування, та при підвищеній продуктивності, іноді використовується схема з роздільними приводами на кожен валок (рис. 1.17д).

Синхронізація приводів забезпечується відкритою або закритою зубчастою передачею. Недоліком такої схеми є ускладнення конструкції та елементів управління, збільшення металоємності та габаритів преса. Тому при виборі такого компонувального рішення завжди оцінюють його економічну і технічну доцільність.

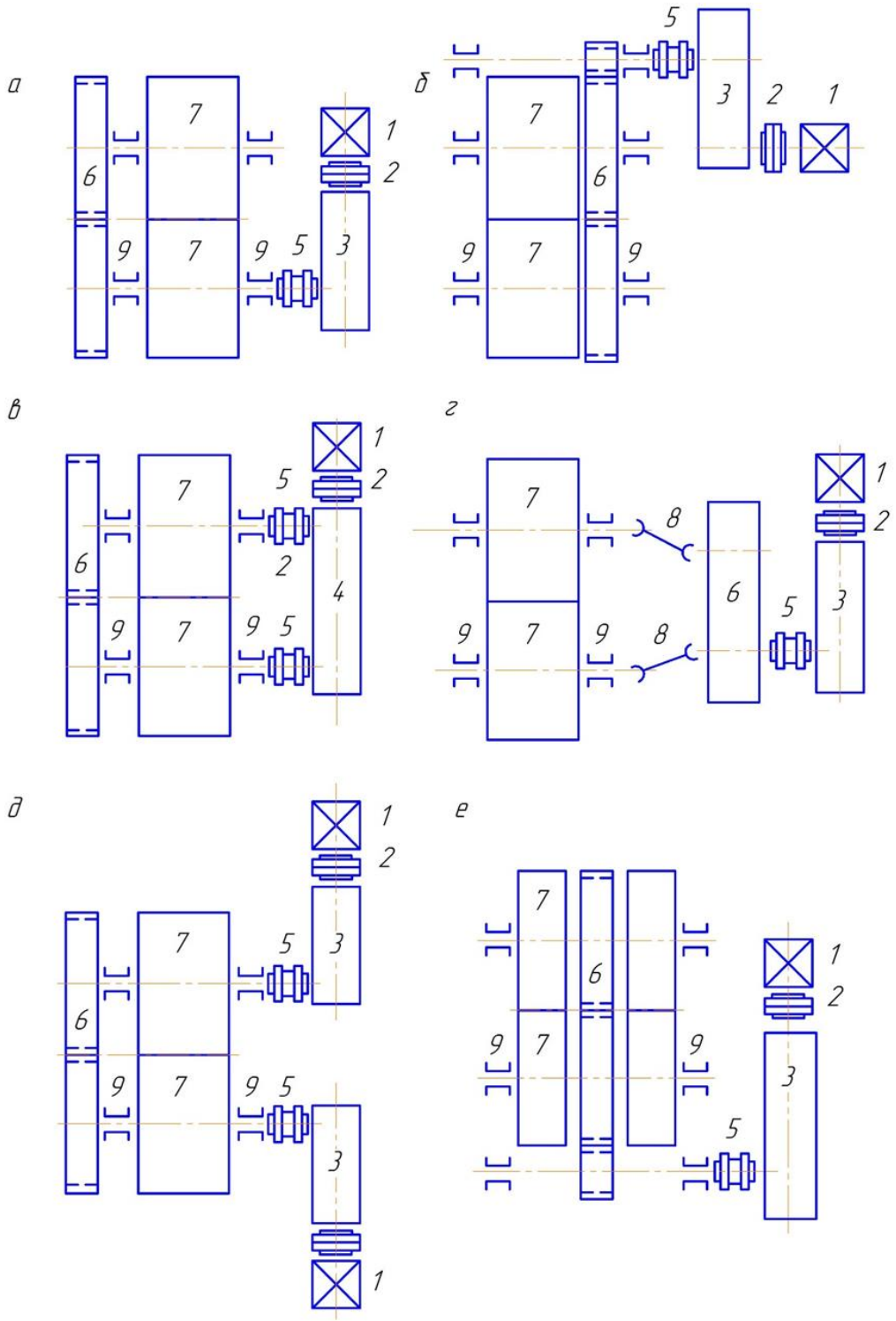


Рисунок 1.17 – Схеми компонувальних рішень валкових брикетних пресів

1 – електродвигун; 2 – муфта з'єднання електродвигуна з редуктором; 3 – редуктор; 4 – роздатковий редуктор; 5 – муфта з'єднання валка з редуктором; 6 – синхронізуюча передача (відкритого або закритого типу); 7 – валки зі змінними бандажами або сегментами; 8 – шпиндель; 9 – підшипникові опори валків.

Компонувальне рішення рис. 1.17в включає валки з двома парами бандажів і розташовану між ними синхронізуючу зубчасту передачу. Таке рішення дозволяє збільшити продуктивність преса, не ускладнюючи лінію приводу та інші конструктивні елементи (станина, рама). Розташування зубчастого колеса синхронізуючої передачі в центрі валків (рис. 1.17е), а не на консолі (рис. 1.17 а, б, в, д), зменшує величину згинальних моментів.

1.2.4. Станини, рами

Головними вимогами до станини і рам валкових пресів є: мала металоємність, висока міцність і жорсткість конструкції; тривалий ресурс експлуатації; можливість швидкого здійснення робіт зі складання та демонтажу, зручність вилучення валків за допомогою підйомно-транспортних пристроїв при ремонтних роботах; надійність і зручність з'єднання валків з елементами приводу преса; зручне розташування і монтаж запобіжних, силовимірювальних пристроїв; технологічність виготовлення.

Станини валкових пресів бувають двох типів – закриті і відкриті.

Закриті станини представляють собою цілісну металеву конструкцію з обробленими паралельними поверхнями для установки і переміщення підшипників з валками. Валки при монтажі та ремонті заводяться в такі станини збоку, для чого необхідні спеціальні монтажні площі біля преса. Закриті станини значно міцніше і надійніше станин відкритого типу, проте в них дуже складно встановлювати валки, особливо при виконанні ремонтних робіт. Через наявність цих незручностей в експлуатації закриті станини не знайшли широкого застосування.

Сучасні валкові преси випускаються, головним чином, з відкритими станинами. Відомі різні варіанти виконання станин відкритого типу для валкових пресів, найбільш поширені з них схематично представлені на рис. 1.18.

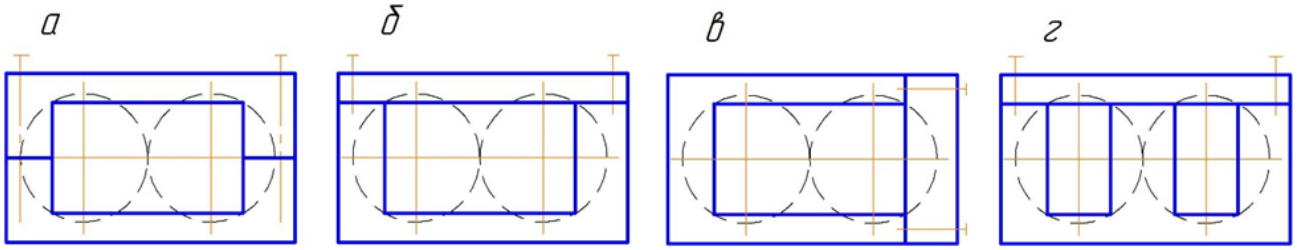


Рисунок 1.18 – Різні варіанти станин відкритого типу
а – U-подібна з роз'ємом на лінії центрів валків; б – U-подібна з роз'ємом зверху; в – горизонтально розташована U-подібна з боковим роз'ємом; г – Ш-подібна

Прикладом валкового преса з станиною відкритого типу може служити експериментальний агрегат, розроблений в ІЧМ (рис. 1.19).

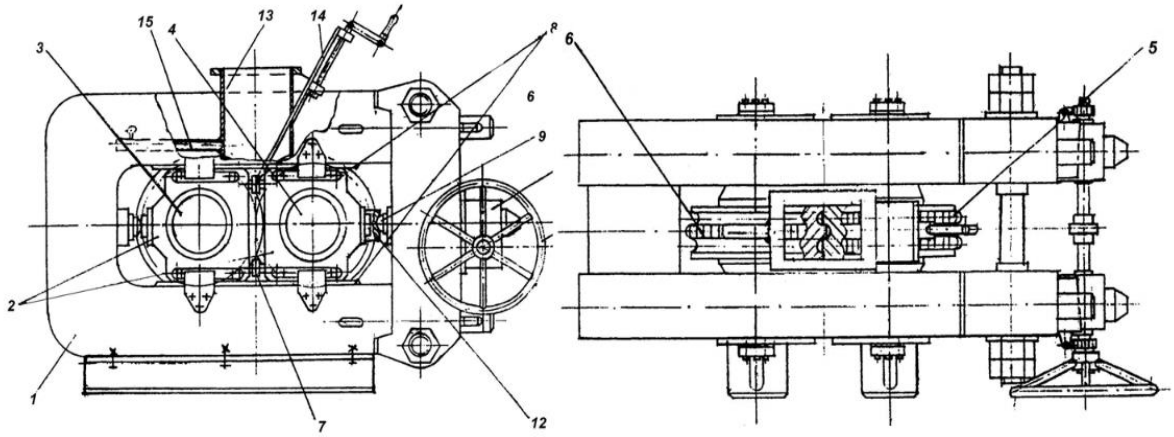


Рисунок 1.19 – Експериментальний валковий прес ІЧМ зі станиною відкритого типу
1 – станина; 2 – подушки з підшипниковими опорами валків; 3, 4 – валки; 5, 6 – змінні кільцеві бандажі; 7 – демпфера; 8 – направляючі подушок валків; 9 – натискні гвинти; 10 – черв'ячний редуктор; 11 – штурвал; 12 – месдоза; 13 – завантажувальний пристрій; 14 – шиберна заслінка; 15 – пристрій для відбору проб шихти

Незалежно від конструкції станини (відкритого або закритого типу), перевалка валків в разі їх зносу або поломки пов'язана з трудомісткими операціями по їх вилученню з преса і відповідно по їх установці. Так, демонтаж валків зі станини відкритого типу, який здійснюється витяганням їх вгору,

вимагає великої кількості операцій по зніманню кришки станини і завантажувального пристрою, від'єднання комунікацій і т. д. Демонтаж валків в пресах із станиною закритого типу здійснюється ще складніше. Крім того, преси станинного типу мають більші габарити та масу. В даний час на зміну станинам традиційних форм розроблені станини, які складаються з елементів, що з'єднуються в єдину конструкцію за допомогою спеціальних з'єднувальних виробів.

Рами, на відміну від станини, дозволяють полегшити і прискорити заміну зношених валків і є найбільш поширеною конструкцій при створенні сучасних валкових пресів. В даний час найбільш відомі два типи рам валкових блоків брикетних пресів – відкидна та мультивідкида. Відкидна рама [36] являє собою самонесучу автономну конструкцію, яка створює можливість швидкої і легкої заміни валків з мінімальними витратами часу на їх демонтаж та монтаж. Для здійснення демонтажу валків досить відкинути бічні стійкі з обох сторін рами і витягти валки разом з їх підшипниковими вузлами по обидва боки преса за допомогою лебідки або додаткового пристрою для викочування валків, оснащеного спеціальним електроприводом. Далі валки або за допомогою відповідного підйомного механізму, або за допомогою спеціального транспортного візку транспортуються на місце техобслуговування. Процедура з монтажу проводиться в зворотному порядку.

Мультивідкидна рама [36] є наступним кроком у розвитку класичної відкидний рами. Цей тип рами особливо підходить для умов, коли є обмеження по площі розміщення преса або вантажопідйомності крану. Для демонтажу валків досить відкинути тільки одну бічну сторону рами. Кожен валок в комплекті з підшипниковими вузлами послідовно викочується на бічну сторону рами за допомогою лебідки або додаткових пристроїв для викочування валків. З цієї позиції валки транспортуються на місце техобслуговування за допомогою відповідного підйомного механізму, або транспортного візка. Процедура монтажу проводиться в зворотному порядку.

Перевагою конструкцій вказаних рам, представлених на є менша металоємність і зручність експлуатації преса в порівнянні зі станинними конструкціями. При цьому рами мають жорсткість достатню для стабільної та надійної експлуатації преса. До недоліків даних рам можна віднести складність виготовлення (велика кількість складових елементів вимагає точного виготовлення та сполучення).

1.2.5. Конструкція валків та формуючих елементів брикетних пресів

Валки з виконаними на їх робочих поверхнях формуючими елементами є основним вузлом преса, за допомогою якого здійснюється формування брикетів. Відомі три основних типи валків: цільні, з кільцевими бандажами і з сегментами.

Цільні валки (рис. 1.20) в практиці брикетування на сьогоднішній день практично не застосовуються, що обумовлено низьким рівнем їх ремонтопридатності.

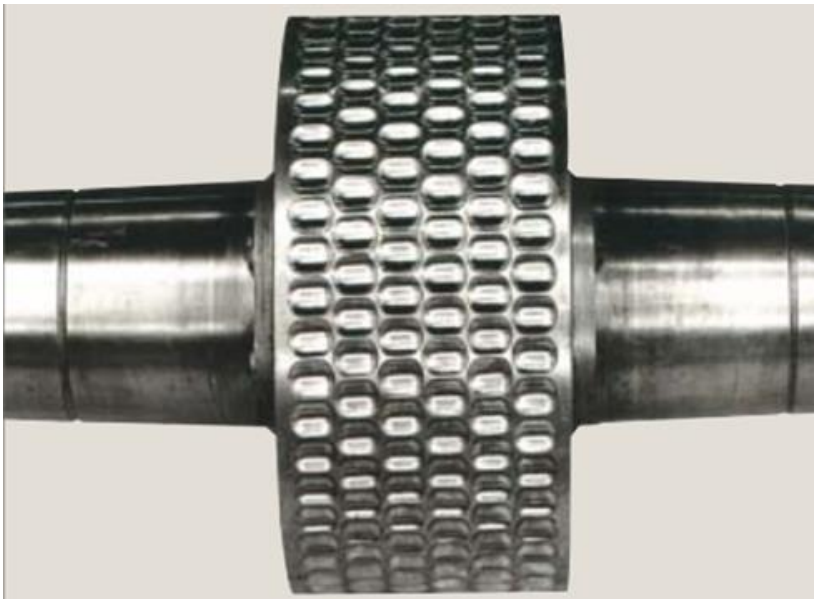


Рисунок 1.20 – Цільний валок

Валками з секційними бандажами (рис. 1.21) у вигляді сегментів в практиці брикетування, як правило, оснащуються преси, що працюють при високих значеннях

тиску пресування – понад 120 ... 150 МПа при брикетуванні малопластичних, хімічно агресивних матеріалів і в процесах гарячого брикетування. Типові розробки валків пресів для брикетування із застосуванням сегментів описані в роботах [42-44]. Виготовляють сегменти з високолегованих сталей з твердістю 60 ... 64HRC, а бандажі зі сталей та інших матеріалів з високою твердістю (56 ... 58HRC) та ударною в'язкістю, що дозволяє переносити великі деформації без виникнення тріщин. У ряді варіантів застосовують нанесення захисного покриття, наприклад, хромування.

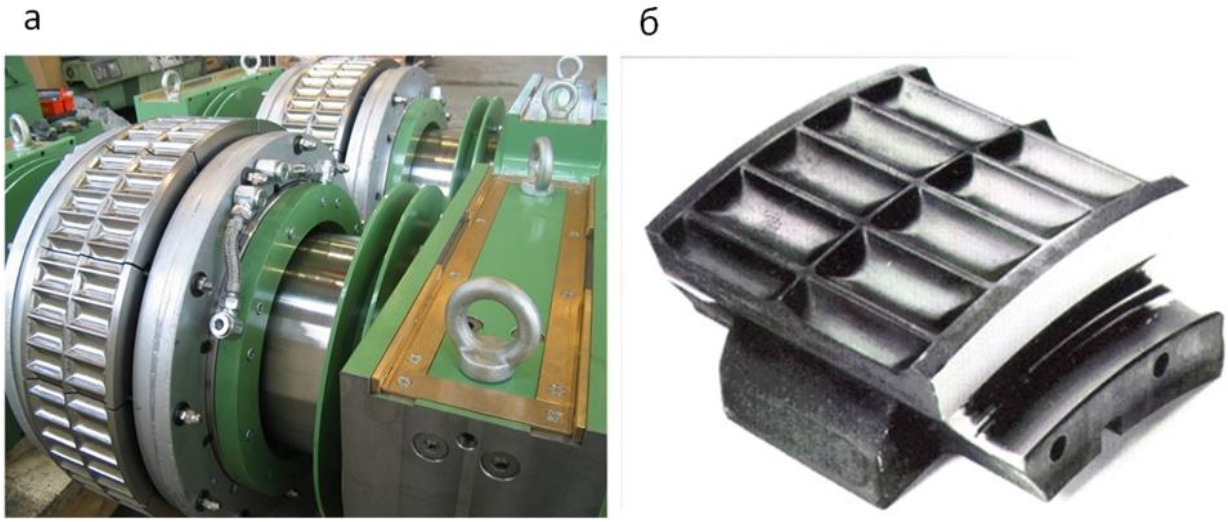


Рисунок 1.21 – Валки з кільцевими сегментами

а – валки; б – сегмент

Аналіз конструкцій валкових пресів фірм «Köppern» і «Верех», проведений фахівцями ІЧМ та ВНДІМЕТМАШ, дозволив виявити ряд конструктивних особливостей валків брикетних пресів.

У ранніх конструкціях сегментів (рис. 1.22а) навантаження діє не вздовж розділової кромки між сегментами, а під деяким кутом. Це призводить до того, що лінія дії проходить поза опорною частини сегмента і створює крутний момент, який прагне відірвати його від поверхні валка. У більш пізніх конструкціях сегментів (рис. 1.21б) їх опорна частина виконана таким чином, що лінія дії сили пресування перетинає опорну частину сегмента і, таким чином, створюється крутний момент, що забезпечує притиснення сегмента до опорної поверхні.

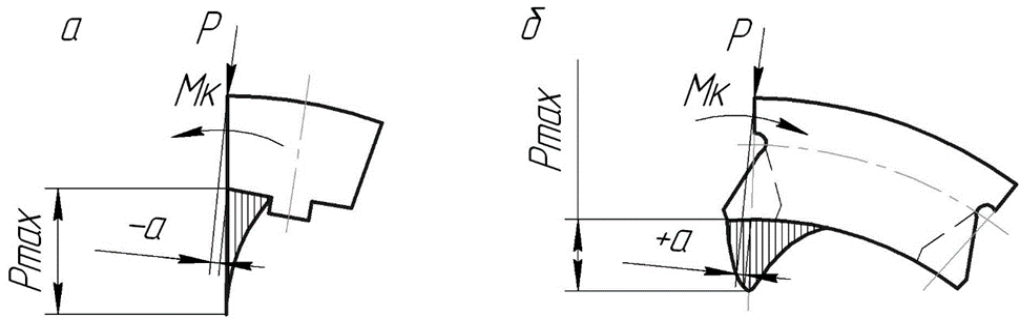


Рисунок 1.22 – Розподіл зусиль в сегментах різних конструкцій

Співробітниками ІЧМ розроблено [45] конструкції валків з сегментами. Відмінною рисою пропонованого технічного рішення є те, що кожен з вузлів фіксації сегментів з валками виконаний у вигляді двох клинів з парою напівциліндричних поздовжніх виступів в кожному клині на стороні протилежній їх похилій поверхні.

Зарубіжні конструкції валків пресів для брикетування із застосуванням сегментів описані в роботах [43,44,46].

Відома велика кількість подібних конструктивних рішень валків із сегментами, що відрізняються між собою рядом індивідуальних особливостей, але всім їм притаманні загальні переваги і недоліки.

Основними недоліками валків, оснащених сегментами, є: складні і недосконалі способи закріплення сегментів на валку; наявність зазорів по лініях стикування сегментів, які збільшуються в процесі зносу робочих поверхонь; при поломці одного з сегментів, як правило, доводиться міняти весь комплект, що пов'язано зі складністю стикування нового сегмента із вже працюючими, що впливає на якість брикетів; збільшення робочої ширини валка з сегментами обмежена недостатньою міцністю сегментів і технологією виготовлення формуючих елементів; складність виготовлення комплекту сегментів обумовлює їх високу вартість.

Вказані особливості визначають обмеженість застосування валків з кільцевими сегментами.

Найбільшого поширення на практиці отримали валки, оснащені кільцевими бандажами (рис. 1.23). На відміну від сегментів бандажі більш прості і зручні з точки зору конструктивного виконання і виготовлення. У поєднанні з сучасними методами виготовлення і відновлення робочої поверхні кільцеві бандажі забезпечують високі експлуатаційні характеристики пресового обладнання.

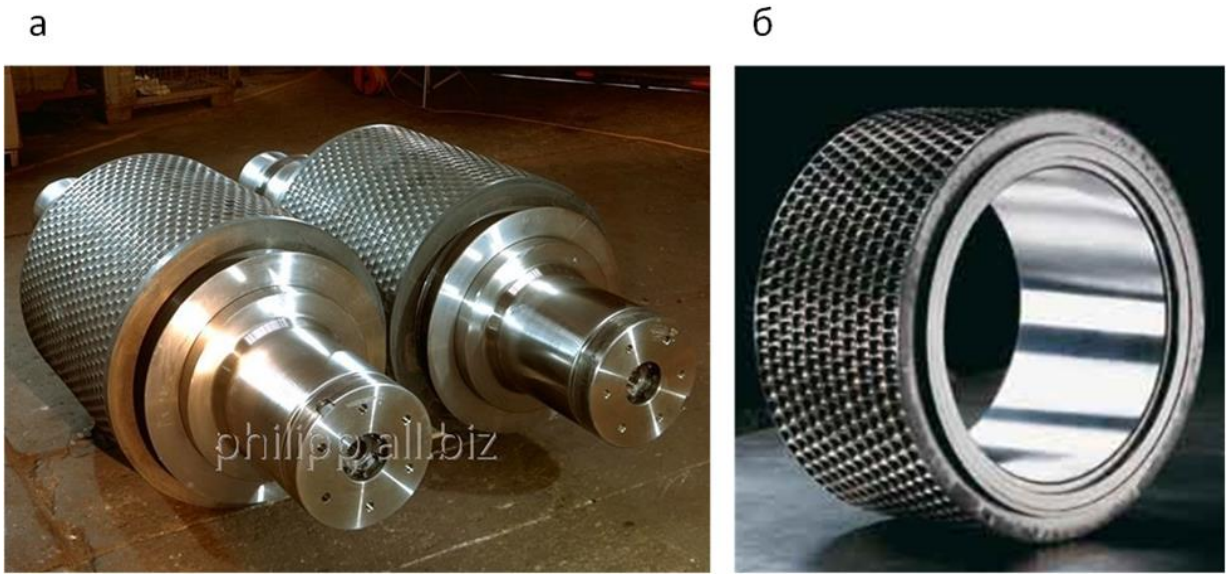


Рисунок 1.23 – Валки з кільцевими бандажами
а – валки; б – бандаж

В даний час при оснащенні валкових пресів найбільше поширення набули бандажі, що виготовляються з низьковуглецевих сталей. Процес термічної обробки таких бандажів включає цементацію протягом 14...16 годин з досягненням глибини цементованої шару не менше 1,5...2 мм, далі загартування і після цього чистову обробку робочих поверхонь і ділянок кріплення бандажа на вал. Твердість пресуючих поверхонь бандажів зазвичай становить 55...62HRC. Таке значення твердості в поєднанні з пластичністю металу серцевини робить бандаж стійким до зовнішніх механічних впливів в процесі взаємодії з матеріалом який брикетується. При брикетуванні високоабразивних матеріалів, таких як відсіви феросплавів ресурс бандажів діаметром 600...700 мм і шириною 200...350 мм становить від 1500 до 3000 т. При брикетуванні менш абразивних матеріалів і при низьких значеннях тиску

пресування стійкість бандажів зростає в рази. Так при брикетуванні вугільних матеріалів ресурс експлуатації комплекту бандажів складає 3…5 років.

Бандажі пресів, призначені для брикетування високоабразивних шихт, виготовляються з низько- і високолегованих сталей з підвищеним вмістом марганцю.

Вибір типорозміру формуючих елементів брикетних пресів визначається низкою взаємопов'язаних факторів, таких як особливості технології брикетування та подальшої переробки отриманих брикетів. які визначаються особливостями технології брикетування та подальшої переробки отриманих брикетів. На валкових пресах виготовляють брикети різної конфігурації об’ємом від 3 до 120 $см^3$. У процесах переробки методом брикетування на валкових пресах сировини для металургійного виробництва найбільшого поширення набули брикети об’ємом від 10 до 50 $см^3$.При виборі розмірів і конфігурації формуючих елементів слід враховувати велику кількість чинників: вимоги, що пред'являються до продукції (форма, розміри, щільність, міцність і ін.); фізико-механічні характеристики шихти і енергосилові параметри брикетування; знос робочих поверхонь валків; пружна післядія в брикетах і т. п.

На практиці встановлено, що для валкових брикетних пресів, що працюють в діапазоні середніх (до 100 МПа) і високих значень тисків пресування (≥100 МПа) кращим є використання валків діаметрами від 500 до 1000 мм. Це, в свою чергу, накладає обмеження на максимальні розміри одержуваних брикетів з умов отримання брикетів із заданою величиною ущільнення та рівномірністю розподілу щільності.

1.2.6. Механізми подачі та попереднього ущільнення шихти

Широкий клас матеріалів (буре вугілля, торф, технічний вуглець і т.п.), що брикетуються на валкових пресах, мають насипну щільність 0,3...0,7 $г/см^3$. При цьому щільність брикетів, отриманих з даних матеріалів, які мають задані споживчі властивості, може перевищувати 1,5 $г/см^3$, тобто, відношення

початкового об'єму до кінцевого, яке називається коефіцієнтом ущільнення *Ку*, може перевищувати 3,0. У ряді випадків для досягнення такої міри ущільнення необхідно забезпечити умови попереднього ущільнення матеріалу що брикетується.

Конструкції механізмів для подачі та попереднього ущільнення дрібнофракційних шихт в осередку деформації валкових пресів різноманітні. Найбільш поширені три схеми подачі шихти в осередок деформації валкового преса (рис. 1.24).

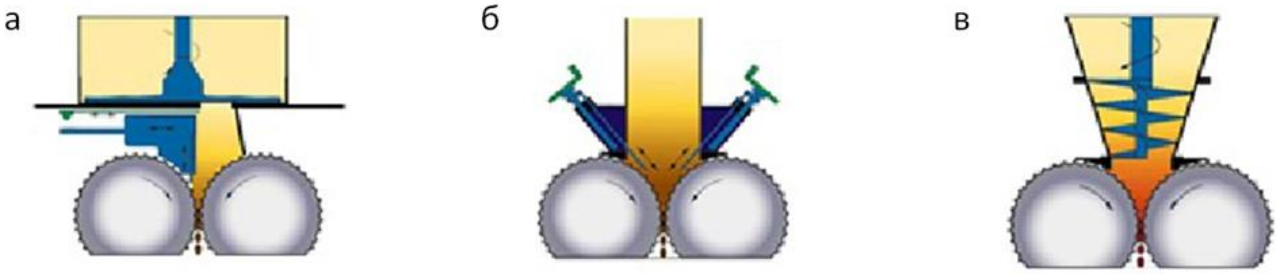


Рисунок 1.24 – Схеми подачі шихти в валковий прес

а – розподільник; б – бункер для гравітаційної подачі шихти оснащений похилими регулювальними плитами; в – пристрій шнекового типу для примусової подачі матеріалу в міжвалковий простір

Система подачі матеріалу (рис. 1.24а) забезпечує постійну по вазі гравітаційну подачу і рівномірний розподіл матеріалу уздовж поверхні валків. Дана система використовується досить рідко, так як ефект від її використання незначний.

Гравітаційна система подачі (рис. 1.24б) з регулюванням за допомогою похилих плит, положення яких може виставлятися вручну або автоматично, є найбільш поширеною для матеріалів з хорошою сипучістю і насипною щільністю ≥0,5 г/см^3.

Схема подачі матеріалу за допомогою шнека (рис. 1.24в) використовується, як правило, для матеріалів з малою насипною щільністю (0,3...0,6 г/см^3), коли необхідно збільшити ступінь ущільнення матеріалу і

продуктивність преса. Також таке технічне рішення застосовується, коли необхідно отримати задану величину ущільнення при зменшеному діаметрі валків преса.

Окрім наведених на рис. 1.24 найбільш поширених схем подачі шихти в валковий прес існують різні їх комбінації, а також нестандартні технічні рішення.

Застосування механізмів для розподілу і попереднього ущільнення шихти, часто спрощено званих підпресовниками або ущільнювачами, дозволяє розширити номенклатуру матеріалів які брикетуються, сприяє ущільненню матеріалів, що мають низьку насипну щільність (0,3...0,6 г/см^3), підвищити продуктивність преса за рахунок збільшення швидкості пресування.

Підпресовники забезпечують вирішення двох основних завдань. По-перше, поліпшується рівномірність розподілу шихти по ширині валка. Нерівномірність розподілу шихти повздовж пресуючих поверхонь при її подачі до міжвалкового простору, зокрема, викликана тертям об стінки, призводить до того, що в крайніх формуючих осередках спостерігається нестача матеріалу, а в центральних – надлишок [12]. Це призводить до нерівномірного зносу валків, коливань тиску пресування в формуючих елементах і, отже, отримання брикетів, що розрізняються за щільністю та міцністю. По-друге, забезпечується попереднє ущільнення шихти перед її остаточним обтисненням в валках. Підпресовка дозволяє подавати в кожен формуючий елемент більшу масу шихти. Внаслідок цього розпірні зусилля між валками збільшуються і створюються умови для брикетування з підвищеним значенням тиску пресування. Крім того, при попередньому ущільненні відбувається часткова дегазація шихти, що також сприяє залученню більшої кількості шихти до міжвалкового простору. Підпресовка особливо необхідна при збільшенні частоти обертання валків преса що ускладнює умови захвату шихти валками.

Необхідна ступінь попереднього ущільнення залежить, в першу чергу, від властивостей шихти – крупності та форми частинок, щільності їх матеріалу, умов обробки перед подачею в прес. Так, наприклад, якщо при брикетуванні порошків

металів, які мають значну насипну щільність зі сферичною формою частинок і діаметром їх близько 0,5 мм попереднє ущільнення не потрібне, то при розмірі частинок цих же металів менше 5 мкм і неправильної форми без попереднього ущільнення не вдається отримати якісно ущільненого продукту, навіть при мінімальній частоті обертання валків.

Відома велика кількість конструкцій пристроїв для попереднього ущільнення матеріалу: лопатеві, центробіжні, вібраційні, шнекові, валкові і т. п.

Найбільш поширеними пристроями, що застосовуються для подачі матеріалів в зону пресування, є шнекові підпресовники (рис. 1.25), які служать для подачі в валки аерованих матеріалів або з низькою насипною щільністю.

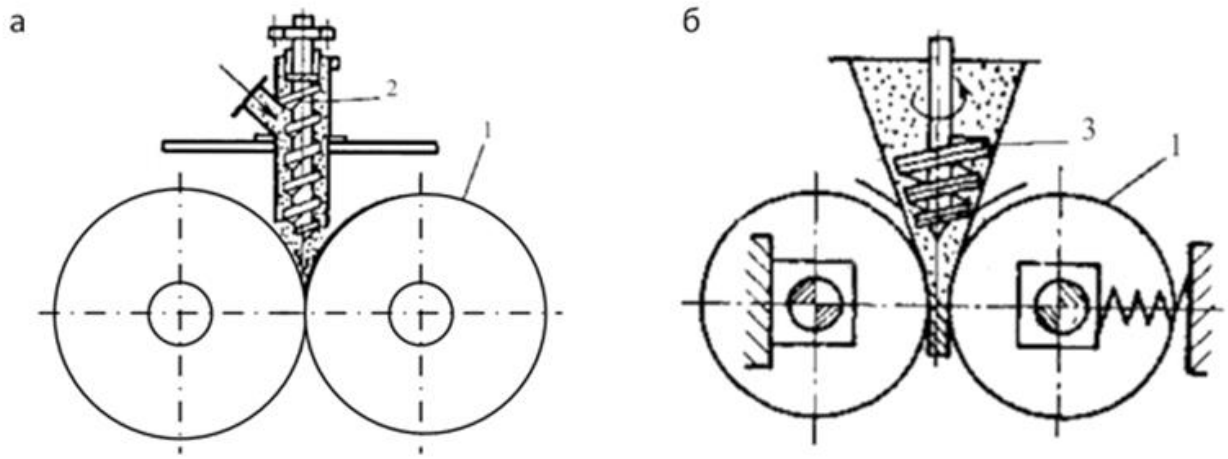


Рисунок 1.25 – Шнекові підпресовники
а – з циліндричним шнеком; б – з конічним шнеком

Шнекові підпресовники забезпечують зменшення проявів процесу псевдоожиження та витиснення матеріалу із зони захоплення валками, так що в широкому діапазоні швидкостей пресування значення коефіцієнту ущільнення залишається практично незмінним. В таких умовах в пресі досягається необхідне ущільнення матеріалу та висока продуктивність при значному коливанні насипної щільності шихти. Шнекові підпресовники виконуються з циліндричним шнеком 2 (рис. 1.25, а), що застосовуються на пресах з тиском

пресування до 80...100 МПа, і з конічним шнеком 3 (рис. 1.25, б) на пресах з тиском пресування понад 100 МПа.

Недоліком підпресовників, які оснащуються конічними шнеками, є нерівномірність розподілу шихти яка брикетується по ширині робочих поверхонь валків. Це визначає обмеження на їх застосування в основному на пресах з малою шириною робочих поверхонь валків, як правило, не більше 200...250 мм.

В роботі [47] визначено взаємозв'язок між величиною силового впливу спіралі шнекового підпресовника на шихту, що транспортується та діаметром валків преса. Встановлено, що зі збільшенням діаметра валків за умови збереження величини тиску пресування в міжвалковому просторі та величина силового впливу шнеку на матеріал, який ущільнюється, знижується. Таким чином, при зменшенні діаметрів валків преса, застосування шнекового підпресовника дозволяє підвищити величину попереднього ущільнення матеріалу який брикетується.

Залежно від властивостей шихти, яка брикетується, ширини робочої поверхні валків та заданої продуктивності підпресовник може включати від одного до чотирьох шнеків. Найбільш перспективними є шнекові підпресовники, що мають в складі елементів управління приводом векторний частотний перетворювач, який дозволяє плавно без втрати потужності регулювати частоту обертання шнека, і, відповідно, режими подачі матеріалу в міжвалковий простір.

В цілому, застосування підпресовників для брикетування цілого ряду шихт з малою насипною щільністю (0,3...0,6 г/см^3) і значною величиною коефіцієнта ущільнення (≥3,0) є не тільки виправданим, але і в деяких варіантах єдино можливим способом забезпечення отримання брикетів необхідної якості.

1.2.7. Пристрої для захисту валків від перевантажень

В якості пристроїв для захисту валків брикетних пресів від перевантажень використовуються попередньо напружені пристрої (ПНП), застосування яких поширене в техніці, зокрема, при захисті металургійних машин від аварійних

поломок [48]. Метою використання ПНП в якості запобіжних пристроїв є забезпечення нечутливості встановленого в рухомих подушках валка 2 (рис. 1.28) до переміщення від навантажень, відповідних заданому (робочому) діапазону зусиль пресування, що забезпечує збереження встановленого зазору між валками, а також збільшення зазору в разі перевантажень за рахунок переміщення (відходу) валка 2. Пристрої для захисту валків від перевантажень найчастіше виконані у вигляді гідроциліндрів [31,32,36,37], встановлених між подушками валка і станиною, рідше – у вигляді пружинних амортизаторів. Відомо кілька варіантів кріплення захисних пристроїв (ЗП) (рис. 1.26).

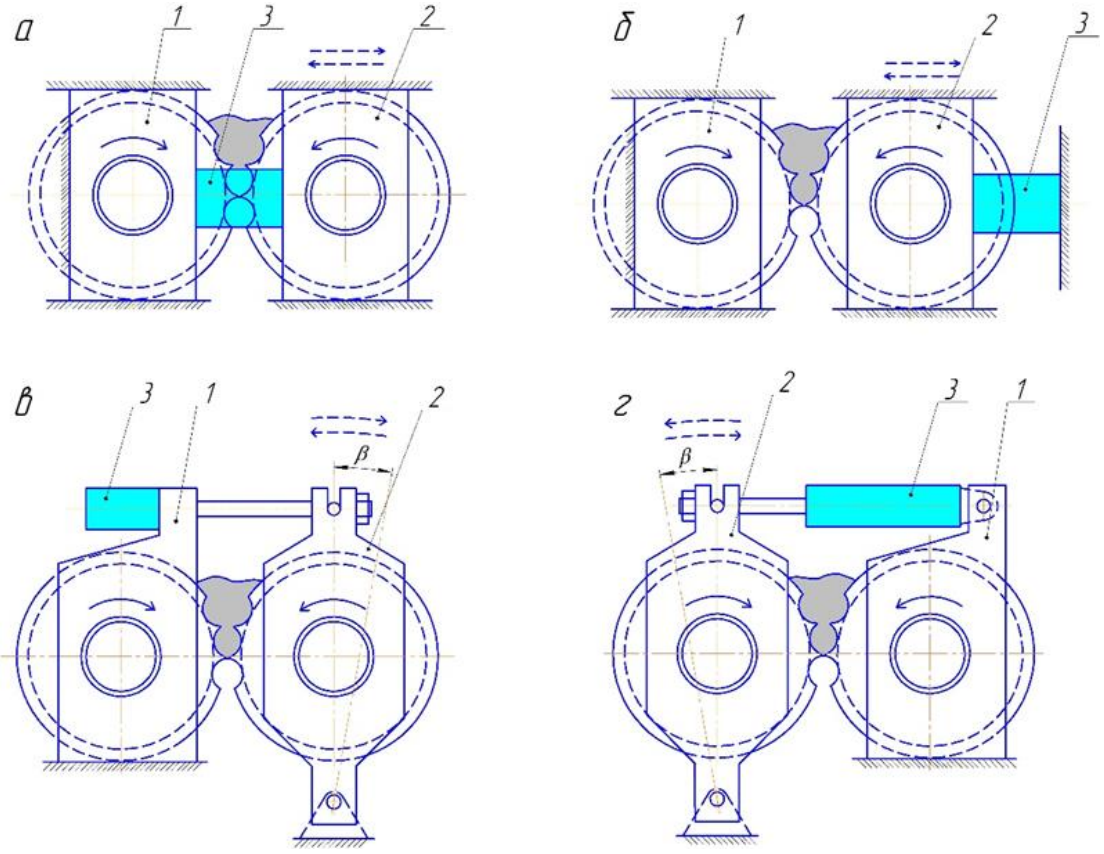


Рисунок 1.26 – Схеми розташування пристроїв для захисту валків преса від перевантажень

а – на лінії центрів валків між подушками валків; б – на лінії центрів валків із зовнішнього боку рухомого валка; в – вище лінії центрів валків із зовнішнього боку нерухомого валка; г – вище лінії центрів валків між подушками валків

1 – нерухомий валок; 2 – рухливий валок; 3 – пристрій для запобігання валків від перевантажень

З конструктивних міркувань установка ЗП на лінії центрів валків (рис. 1.26 а, б) є найбільш зручною і логічною з точки зору його налаштування на задане зусилля пресування. Однак, установка ЗП в зазначеному положенні не є кращою з точки зору збільшення його габаритних розмірів, викликаних підвищенням жорсткості пружних елементів, що сприймають діюче зусилля пресування. Перш за все, це відноситься до пружинних амортизаторів. У зв'язку з цим доцільною є установка ЗП на деякій відстані від лінії центрів валків (рис. 1.26 в, г), де навантаження на ЗП буде істотно нижчим від реального, що виникає по лінії центрів валків. При цьому ступінь зменшення навантаження буде визначатися відстанню від лінії центрів валків.

Гідравлічні захисні пристрої. У більшості конструкцій валкових пресів, розрахованих на сприйняття значних розпірних зусиль, рухливий валок утримується в рівновазі щодо нерухомого валка при брикетуванні матеріалу за допомогою гідроциліндрів. В даний час провідні світові виробники валкових пресів використовують три основні варіанти гідравлічних пристроїв для захисту пресів від перевантажень.

У першому варіанті [29] пристрій включає чотири гідроциліндри з ходом до 25 мм, встановлені попарно на кожну подушку рухомого валка. Залежно від конструкції преса гідроциліндри можуть бути плунжерними або поршневими. Привод системи здійснюється від гідравлічної станції, що має акумулятор і мембранний роздільник.

Другий варіант системи (рис. 1.27) також має чотири гідроциліндри, що живляться від одного насосу. Відмінність від першої системи полягає в тому, що кожна пара гідроциліндрів має свій акумулятор, установлюваний, як правило, максимально близько до циліндрів поблизу подушок валків. Також система має запобіжний клапан, що забезпечує при перевантаженні валкового блоку відхід рухомого валка і тим самим розвантаження несучих елементів преса.

Третій варіант системи (рис. 1.28) захисту валків від перевантажень складається з двох гідроциліндрів, що встановлюються по одному на кожну подушку рухомого валка. Кожен циліндр має індивідуальний привод, до складу якого входять насос, акумулятор і запобіжний клапан.

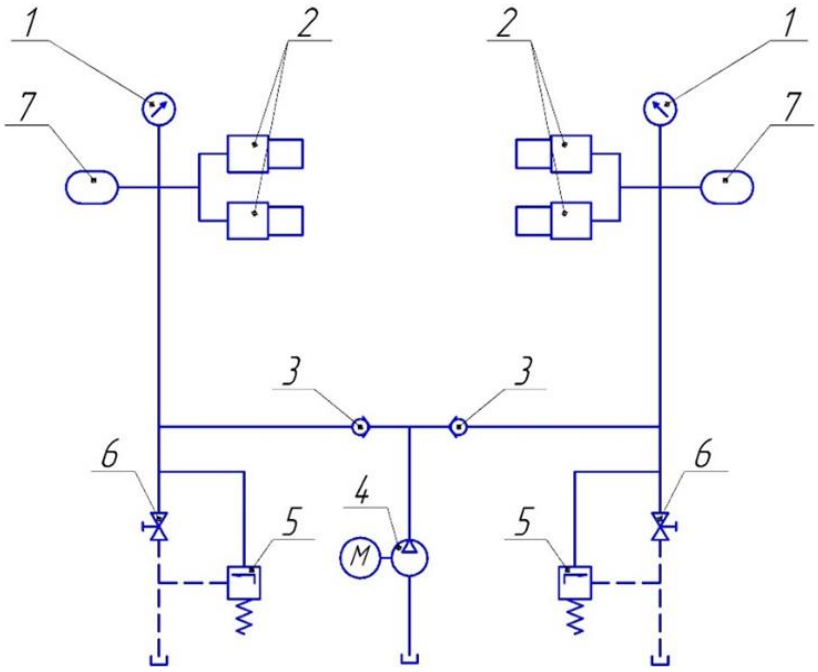


Рисунок 1.27 – Гідравлічна схема пристрою захисту преса від перевантажень
1 – контактний манометр; 2 – гідроциліндр; 3 – запобіжний клапан; 4 – мотор-насос; 5 – зворотний клапан; 6 – запірний вентиль; 7 – гідроакумулятор

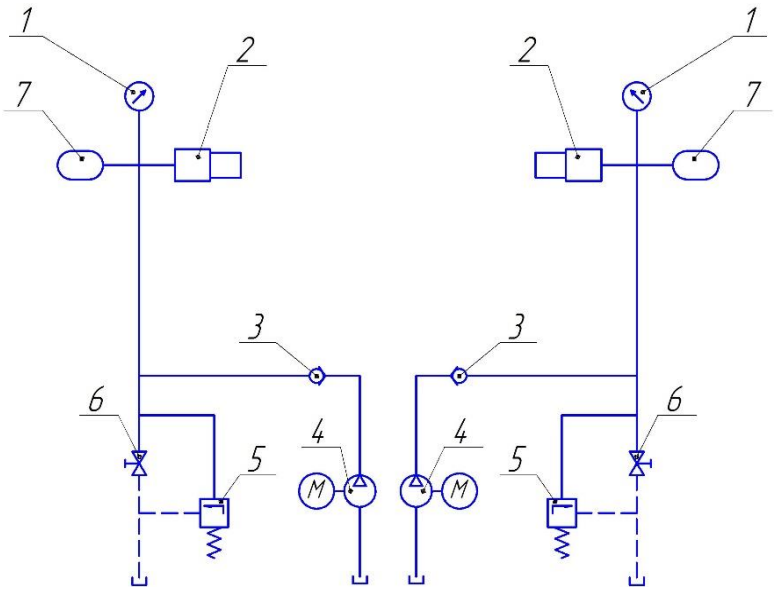


Рисунок 1.28 – Гідравлічна схема пристрою захисту преса від перевантажень 1 – контактний манометр; 2 – гідроциліндр; 3 – запобіжний клапан; 4 – мотор-насос; 5 – зворотний клапан; 6 – запірний вентиль; 7 – гідроакумулятор

Подібні конструктивні рішення застосовані і використовуються до теперішнього часу фірмами «Maschinenfabrik Köppern GmbH & Co. KG»,«Sahut Conreu »,«Верех» і «K. R. Komarek Inc» [31,36-38].

В роботі [29] відзначено, що описані раніше компонувальні рішення гідросистем захисту валків від перевантажень мають такі недоліки: система, що має чотири гідроциліндри, є статично невизначеною, що не дозволяє прогнозувати переміщення подушок рухомого валка, так як рух плунжерів кожного з циліндрів буде визначатися випадковими величинами зовнішніх опорів і тертя в ущільненнях; дані схеми не передбачають дроселювання робочої рідини при зворотному ході валка; при відході рухомого валка через несинхронність переміщення гідроциліндрів при різкому зростанні розпірного зусилля може відбуватися кантування подушок та їх заклинювання у станині.

Також сформульовані основні вимоги до гідравлічних систем захисту валкових брикетних пресів від перевантажень, основна частина з яких навіть справедлива і для механічних запобіжних пристроїв: забезпечення стабільної настройки величини зусилля пресування, при якій спрацьовує захисний пристрій; можливість швидкого розмикання валків при різкому зростанні зусилля пресування; забезпечення уповільненого зведення валків після розмикання для уникнення пошкодження деталей та вузлів прес; можливість точного вимірювання зусилля пресування пристроями, що входять до складу системи.

Механічні захисні пристрої. У валкових пресах в якості механічних захисних пристроїв застосовуються попередньо напружені пристрої різних конструкцій, які представляють собою пружинні амортизатори, які широко розповсюджені для захисту від перевантажень механічного обладнання на підприємствах металургійної промисловості. В якості демпфуючих елементів використовуються прорізні і тарілчасті пружини (рис. 1.29).

Прорізні пружини мають постійну жорсткість, яка визначається властивостями матеріалу. Для перенастроювання захисного пристрою з пружинами такого типу може не вистачити зміни зусилля затяжки і потрібна заміна на інший типорозмір, що веде до зміни конструкції всього пристрою.

У механічних пристроях для захисту валків від перевантаження, які застосовуються на валкових пресах конструкції ІЧМ, використовуються тарілчасті пружини. Перевага використання тарілчастих пружин обумовлена тим, що, використовуючи різні схеми складання пружин в пакети (рис. 1.32), можна, не збільшуючи номенклатури пружин, коригувати характеристику «сила-деформація захисного пристрою» [49].

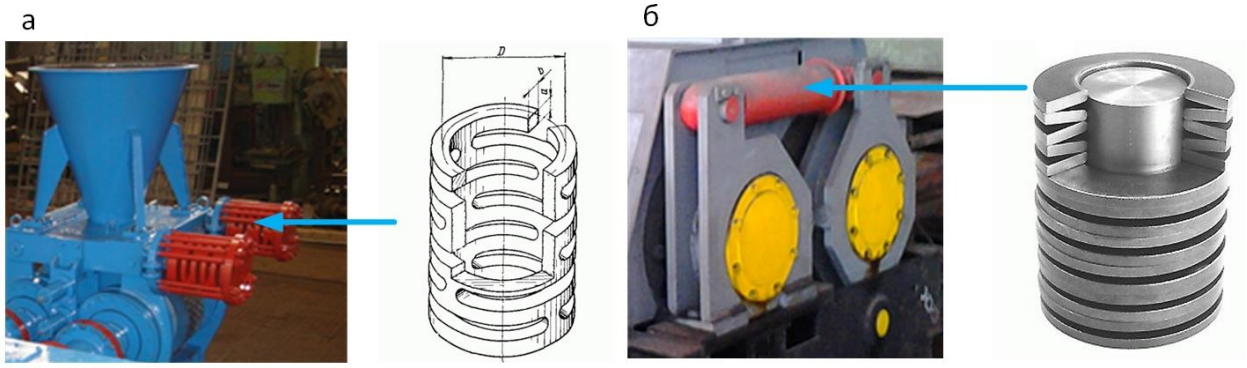


Рисунок 1.29 – Механічні пристрої для захисту преса від перевантажень з різними типами пружин

а – з прорізними пружинами; б – з тарілчастими пружинами

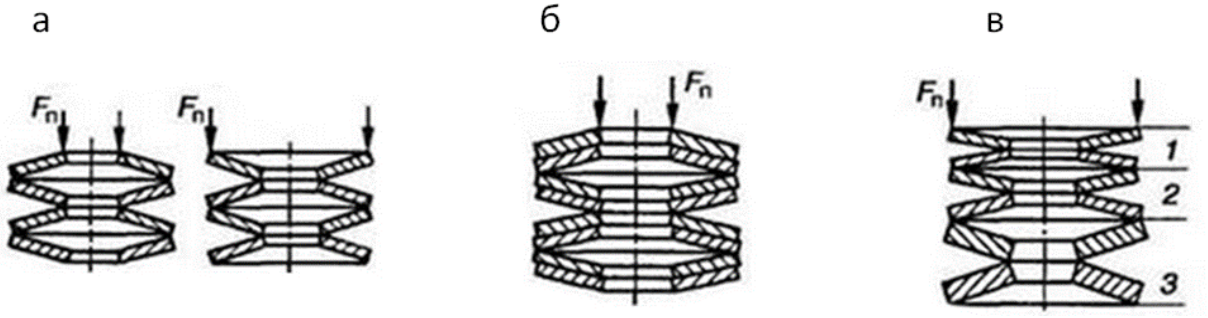


Рисунок 1.32 – Схеми складання пружин захисного пристрою для в пакети

а – послідовна; б – паралельно-послідовна; в – пружини різної товщини

1.2.8. Технічні рішення, що забезпечують контроль та регулювання режимів роботи валкових пресів

Системи моніторингу для спостереження, реєстрації стану і управління технологічними процесами та роботою обладнання представляються ефективним засобом зниження витрат на експлуатацію валкових пресів і підвищення якості продукції. Сучасні комп’ютерні системи моніторингу на

виробництві стають все більш доступними через зниження вартості комп'ютерів і розширення можливостей датчиків.

Преси провідних зарубіжних виробників обладнуються контрольно-вимірювальною апаратурою та системами автоматизації. Преси можуть поставлятися з частотнорегульованим приводом. У конструкцію преса включають механічні та електричні пристрої забезпечення безпеки його роботи. На окремих моделях пресів для компенсації розбігу характеристик матеріалів які пресуються, зусилля пресування підтримується постійним за допомогою автоматичного управління швидкістю обертання шнеків для подачі і попереднього ущільнення.

За спеціальним замовленням на валкових пресах для вимірювання зусилля пресування можуть встановлюватися силовимірювальні датчики. Для них характерні висока точність, стабільність в часі, висока пило- та вологозахищенність. Серед силовимірювальних датчиків найбільший діапазон застосування мають тензорезисторні. Діапазон вимірювання тензорезисторних силовимірювальних датчиків від 5 Н до 5 МН. Основним фактором вибору тензорезисторних силовимірювальних датчиків є висока точність вимірювання – їх похибка не перевищує 0,03%. Тензодатчики, встановлені в станині преса, забезпечують прецизійний вимір реального зусилля пресування.

Для реєстрації моменту пресування застосовуються датчики крутного моменту, різних типів: з передачею крутного моменту через вал або фланець; нерухомі датчики моменту вимірюють реакцію опори. Передача сигналу здійснюється безконтактним способом або за допомогою контактних кілець.

Вимірювання фактичного значення моменту пресування дозволяє, перш за все, оцінити навантаження на привод преса, що особливо важливо в період налаштування його роботи. Однак застосування в промислових умовах вказаних вище датчиків не завжди доцільно, враховуючи додаткові витрати. Тому найчастіше на виробництві оцінку навантажень приводу пресу здійснюють за значеннями току електродвигуна, які фіксуються за допомогою приладів, вбудованих в частотний перетворювач.

Досягнення останніх років в області силової напівпровідникової і мікропроцесорної техніки у поєднанні з перевагами асинхронного двигуна, як найбільш простого, роблять електропривод з асинхронним двигуном і перетворювачем частоти одним з найбільш застосовуваних типів електроприводу [50-56]. Зарубіжні валкові преси, як правило, оснащуються частотними перетворювачами провідних виробників – Mitsubishi, Hitachi, Siemens, Schneider Electric та ін. Більшість сучасних частотних перетворювачів можна підключити до комп'ютеру за допомогою USB кабелю і за допомогою програмного забезпечення налаштовувати параметри, або контролювати робочі режими приводу.

У реальних виробничих умовах можливі ситуації, коли через порушення технологічних вимог до матеріалу який брикетується, помилки оператора або аварійної ситуації, в зону пресування потрапляє некондиційна шихта, або сторонній предмет. Це може викликати перевантаження, вихід з ладу вузлів преса, вплинути на якість брикетів. У зв'язку з цим, потрібна розробка системи, яка повинна дати сигнал на зміну режиму подачі матеріалу в зону пресування, частоти обертання валків або на відключення приводу.

З метою забезпечення контролю та регулювання роботи валкових пресів вони повинні бути оснащені пристроями контролю і реєстрації зусилля пресування. Такі пристрої повинні забезпечувати: безперервний в процесі роботи валкового преса контроль зусилля пресування; відображення даних про зусилля пресування на цифровому табло вторинного приладу; можливість підключення комп’ютера з відповідним спеціалізованим програмним забезпеченням, яке дозволяє відображати динаміку зміни зусилля пресування у вигляді графіків і таблиць.

1.3. Аналіз показників виробничої і технологічної ефективності валкових пресів і формування напрямків їх вдосконалення

Для оцінки ефективності технічного рівня валкових пресів використовують ряд показників, які відомі в області дослідження питань підвищення енергоефективності, надійності і ресурсу експлуатації промислового

обладнання в металургії та суміжних галузях промисловості [53-55]: питоме зусилля пресування P_u; питома енергоємність E_u; питома металоємність G_u; питома вартість S_u.

Питоме зусилля пресування досить широко поширене поняття, що характеризує силові показники валкових машин, визначається як відношення максимального зусилля пресування P_{max}, до ширини робочої поверхні валків L_V:

$$P_u = P_{\max} / L_V \ . \qquad (1.1)$$

Питома енергоємність являє собою відношення потужності N_{pr} приводу до продуктивності N_{pr} преса:

$$E_u = N_{pr} / Q_{pr} \ . \qquad (1.2)$$

Питома металоємність являє собою відношення маси преса m_{pr} до величини корисного ефекту від його використання або основного технічного параметра, в даному варіанті – продуктивності Q_{pr}:

$$G_u = m_{pr} / Q_{pr} \ . \qquad (1.3)$$

Питома вартість є достатньо вагомим фактором, який впливає на прийняття рішення з придбання пресового обладнання. Даний показник визначається як співвідношення вартості преса до його конструктивних або експлуатаційних показників, наприклад, маси або продуктивності

$$S_u = S_{pr} / Q_{pr} \ \text{ або } \ S_u = S_{pr} / m_{pr} \, . \qquad (1.4)$$

При аналізі розрахункових значень показників P_u, E_u, G_u и S_u прийняті наступні критерії оцінки.

Найбільш широкий діапазон матеріалів, що брикетуються буде мати та модель преса, якій відповідало би найбільше значення питомого зусилля пресування:

$$P_u \to P_{u.\max}. \tag{1.5}$$

Досягненню максимальної продуктивності при наявній потужності приводу преса відповідає мінімум питомої енергоємності:

$$E_u \to E_{u.\min}. \tag{1.6}$$

Раціональному конструктивному виконанню преса відповідає мінімальне значення питомої металоємності

$$G_u \to G_{u.\min}. \tag{1.7}$$

При оцінці пресів за значенням питомої вартості береться до уваги відношення вартості преса до його продуктивності, тому цей параметр при виборі моделі преса має трохи більше значення ніж маса

$$S_u \to S_{u.\min}. \tag{1.8}$$

Критерії оцінки (1.5-1.8) дозволяють сформулювати гіпотезу оцінки технологічності та ефективності валкових пресів для брикетування наступним чином. Серед аналізованих моделей валкових пресів найбільш ефективним є той, який забезпечуючи максимальну, в заданому діапазоні, величину питомого зусилля пресування, характеризується мінімальними значеннями питомої енергоємності,

металоємності і вартості. Базуючись на даній гіпотезі і розрахункових даних проведено аналіз валкових пресів конструкції ІЧМ.

Виходячи з аналізу цих критеріїв слід відзначити, що найбільш ефективним є такий валковий прес, який забезпечуючи максимальну, в заданому діапазоні, величину питомого зусилля пресування, характеризується мінімальними значеннями питомої енергоємності, металоємності і вартості. Базуючись на цьому виконано аналіз валкових пресів різних виробників, серед яких є провідні світові лідери на ринку валкових пресів – Koeppern (Німеччина), K.R. KOMAREK Inc. (США), обидві з недавнього часу входять до корпорації Koeppern Group, та Bepex (США) (табл. 1.2 – 1.4). В останні роки суттєву конкуренцію для всіх виробників валкових пресів становлять преси китайського виробництва. В таблиці 1.5 наведені технічні характеристики преса, який виробляється на типовому підприємстві КНР. Близькими за технічними характеристиками та ціною до валкових пресів ІЧМ (табл. 1.7) є преси, які виготовляються ЗАТ «Спайдермаш» (Росія) (табл. 1.6).

Дані, які представлені в табл. 1.2-1.5 та описані в даному розділі, дозволяють зробити узагальнення основних типів конструктивного виконання валкових пресів високого тиску та виконати порівняльний аналіз різних модифікацій пресів.

Для зіставлення запропоновано ввести нове маркування моделей пресів ІЧМ, яке в скороченому вигляді відображає основні технічні характеристики. Схема, що пояснює принцип маркування, наведена на рис. 1.32.

Дані, які наведені в табл. 1.7 та на рис. 1.31-1.32, вказують на те, що преси ІЧМ у відповідності до класифікації, представленої на рис. 1.1, відносяться до пресів малого та середнього тиску пресування. Тобто, максимальне питоме зусилля пресування для більшості модифікацій валкових пресів, розроблених в ІЧМ, не перевищує 55 кН/см. Преси ПБВ-647/202-1000-М та ПБВ-647/360-2000-Г-П, також можна віднести до цієї категорії класифікації, бо максимально допустимі значення питомого зусилля пресування для них вище за 55 кН/см не більше ніж на 10%.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики та показники ефективності валкових пресів високого тиску для брикетування фірми Koeppern (Німеччина)

Модель преса	40	52	60	72	92	500
Технічні характеристики						
Розташування валків	горизонтальне, симетричне					
Напрям потоку ущільнюваної шихти	вертикальний					
Спосіб подачі шихти в прес	гравітаційний/примусовий (шнековий підпресовник)					
Діаметр валків, мм	500; 650; 750	650; 750; 1000	650; 750; 1000; 1400	750; 1000; 1400	1000; 1400	1000; 1400
Ширина валків, мм	200; 400	200; 400; 600	400; 600; 800	400; 600; 800; 1000; 1250	600; 800; 1000; 1250; 1500	800; 1000; 1250; 1500
Тип валків	бандажовані/сегментовані*					
Тип пристрою захисту валків від перевантаження	гідравлічний					
Максимальне зусилля пресування, кН	1430	2330	2910	4970	7350	8700
Потужність приводу пресу, кВт	Від 25 до 800*					
Продуктивність, т/годину	Від 0,5 до 100*					
Маса, кг	Від 2 до 400*					
Показники ефективності						
Максимальне питоме зусилля пресування *Pu*, кН/см	114	150	150	150	150	150

*В залежності від модифікації

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики та показники ефективності валкових пресів високого тиску для брикетування фірми K.R. KOMAREK Inc. (США)

Модель преса	B220B (промислово-випробувальний)	B400B	BH400CH	DH300	DH400	DH450	DH500
Технічні характеристики							
Розташування валків	вертикальне, консольне	вертикальне, консольне	горизонтальне, консольне	горизонтальне, симетричне	горизонтальне, симетричне	горизонтальне, симетричне	горизонтальне, симетричне
Напрям потоку ущільнюваної шихти	горизонтальний	горизонтальний	вертикальний	вертикальний	вертикальний	вертикальний	вертикальний
Спосіб подачі шихти в прес	примусовий (шнековий підпресовник)	примусовий (шнековий підпресовник)	гравітаційний/ примусовий (шнековий підпресовник)	гравітаційний/ примусовий (шнековий підпресовник)	гравітаційний/ примусовий (шнековий підпресовник)	гравітаційний/ примусовий (шнековий підпресовник)	гравітаційний/ примусовий (шнековий підпресовник)
Діаметр валків, мм	304	460	457	330…520	521	711	711
Ширина валків, мм	75	150	203	102…330	102…508	229…686	229…508
Тип валків	бандажовані	бандажовані	бандажовані	суцільні/ сегментовані	суцільні/ сегментовані	суцільні/ сегментовані	суцільні/ сегментовані
Тип пристрою захисту валків від перевантаження	гідравлічний						
Максимальне зусилля пресування, кН	311	1067	980	670	1334	1780	2936
Потужність приводу пресу, кВт	15	75	186	56	75	112	186
Потужність приводу підпресовника, кВт	3,7	11,0	19,0	11,0	22,0	15,0	22,0
Продуктивність, т/годину	0,115…0,450	2,5…9,0	4,5…9,0	2,0…9,0	4,5…18,0	9,0…36,0	18,0…55,0
Маса, кг	3600	12000	9980	9850	14500	23000	33000
Показники ефективності							
Питоме зусилля пресування *Pu*, кН/см	41,5	71,1	48,3	20,3…65,7	26,3…130,7	26,0…77,7	57,8…128,2
Питома енергоємність *Eu*, кВт×годину/(т×годину)	41,5…162,6	9,6…34,4	22,8…45,5	7,4…33,5	5,4…21,6	3,5…14,1	3,8…11,6
Питома металоємність *Gu*, т/(т×годину)	8,0…31,1	1,3…4,8	1,1…2,1	1,1…4,9	0,8…3,2	0,63…2,5	0,6…1,8

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики та показники ефективності валкових пресів високого тиску для брикетування фірми Верех (США)

Модель преса	MS 75	MS 150	MS 200	MS 300	MS 360	MS 600
Технічні характеристики						
Розташування валків	горизонтальне, симетричне					
Напрям потоку ущільнюваної шихти	вертикальний					
Спосіб подачі шихти в прес	примусовий (шнековий підпресовник)	гравітаційний/примусовий (шнековий підпресовник)				
Діаметр валків, мм	520	520	711	711	920	1100
Ширина валків, мм	230	285	550	300	800	-
Максимальне зусилля пресування, кН	750	1500	2000	3000	3600	6000
Тип пристрою захисту валків від перевантаження	гідравлічний					
Потужність приводу пресу, кВт	45	90	160	200	250	550
Потужність приводу підпресовника, кВт	11,0					
Продуктивність, т/годину	2,4	7,5	10,0	15,0	30,0	50,0
Маса, кг	9500	12000	12000	30000	50000	80000
Показники ефективності						
Питоме зусилля пресування Pu, кН/см	32,6	52,6	36,4	100,0	45,0	-
Питома енергоємність Eu, кВт×годину/(т×годину)	18,75	12,0	16,0	13,3	8,3	11,0
Питома металоємність Gu, т/(т×годину)	4,0	1,6	1,2	2,0	1,7	1,6

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики та показники ефективності валкових пресів високого тиску для брикетування фірми Luoyang Zhongyuan Mining Machine Manufacture Co., Ltd (Китай)

Модель преса	GY520-150	GY650-220	GY750-200	GY750-300	GY800-380	GY1000-350	GY1000-450	GY1000-500	GY1000-500	GY1000-540	GY1200-800	GY1400-1000
Технічні характеристики												
Розташування валків	горизонтальне, симетричне											
Напрям потоку ущільнюваної шихти	вертикальний											
Спосіб подачі шихти в прес	гравітаційний/примусовий (шнековий підпресовник)											
Діаметр валків, мм	520	650	750	750	800	1000	1000	1000	1000	1000	1200	1400
Ширина валків, мм	196	205	320	280	350	460	500	500	900	900	900	1000
Максимальне зусилля пресування, кН	1500	2200	2000	3000	3800	3500	4500	5000	4500	5400	8000	10000
Тип пристрою захисту валків від перевантаження	гідравлічний											
Потужність приводу пресу, кВт	55	90	110	185	200	250	280	315	280	185×2	280×2	355×2
Продуктивність, т/годину	2,2…3,5	4,0…6,5	7,0…10,0	6,0…8,5	8,0…10,0	10,0…15,0	14,0…17,0	15,0…20,0	25,0…30,0	30,0…35,0	40,0	50,0
Маса, кг	13700	19200	24500	34000	39300	50000	58500	58500	63000	59300	110000	156000
Показники ефективності												
Питоме зусилля пресування, максимальне *Pu*, кН/см	80	110	60	110	110	80	90	100	50	60	80	100
Питома енергоємність *Eu*, кВт×годину/(т×годину)	16…25	14…23	11…16	22…31	20…25	17…25	17…20	16…18	9…11	11…12	14	14,2
Питома металоємність *Gu*, т/(т×годину)	3,9…6,2	3,0…4,8	2,5…3,5	4,0…5,7	3,9…4,9	3,3…5,0	3,4…4,2	2,9…3,9	2,1…2,5	1,7…2,0	2,8	3,1

Таблиця 1.6 – Технічні характеристики та показники ефективності валкових пресів високого тиску для брикетування фірми ЗАТ Спайдермаш (Росія)

Модель преса	ПБВ-400/200-100	ПБВ-600/200-150П	ПБВ-600/250-150	ПБВ-700/400-200	ПБВ-700/250-200	ПБВ-700/300-200П	ПБВ-800/330-300П	ПБВ-1000/400-400П	ПБВ-1000/430-400П
Технічні характеристики									
Розташування валків	горизонтальне, симетричне								
Напрям потоку ущільнюваної шихти	вертикальний								
Спосіб подачі шихти в прес	гравітаційний	гравітаційний	гравітаційний	гравітаційний	гравітаційний	примусовий (шнековий підпресовник)	примусовий (шнековий підпресовник)	примусовий (шнековий підпресовник)	примусовий (шнековий підпресовник)
Діаметр валків, мм	400	600	600	700	700	700	800	1000	1000
Ширина валків, мм	200	200	250	400	250	300	350	400	430
Максимальне зусилля пресування, кН	1000	1500	1500	2000	2000	2000	3000	4000	4000
Тип пристрою захисту валків від перевантаження	механічний	механічний	механічний	механічний	механічний	механічний	механічний	гідравлічний	гідравлічний
Потужність приводу пресу, кВт	-	-	-	-	-	-	-	-	160
Потужність приводу підпресовника, кВт	-	10,0	-	-	11,0	-	22	-	30
Продуктивність, т/годину	1,0…5,0	2,0…4,0	3,0…10,0	10,0…20,0	4,0…6,0	5,0…30,0	3,0…9,0	20,0…54,0	15,0…25,0
Маса, кг	-	-	-	-	-	-	-	-	44000
Показники ефективності									
Питоме зусилля пресування, *Pu*, кН/см	50,0	75,0	60,0	50,0	80	67,0	85	100,0	93,0
Питома енергоємність *Eu*, кВт×годину/(т×годину)	-	-	-	-	-	-	-	-	6,4…10,7
Питома металоємність *Gu*, т/(т×годину)	-	-	-	-	-	-	-	-	1,76…2,93

Таблиця 1.7 – Технічні характеристики та показники ефективності валкових пресів для брикетування, розроблених спеціалістами ІЧМ

Модель преса	ПБВ-500/202-750-М	ПБВ-647/202-1000-М	ПБВ-647/360-1200-М	ПБВ-647/360-1500-М-П	ПБВ-647/360-2000-Г-П
Технічні характеристики					
Розташування валків	горизонтальне, симетричне				
Напрям потоку ущільнюваної шихти	вертикальний				
Спосіб подачі шихти в прес	гравітаційний	гравітаційний/примусовий (шнековий підпресовник)	гравітаційний	гравітаційний/примусовий (шнековий підпресовник)	гравітаційний/примусовий (шнековий підпресовник)
Діаметр валків, мм	500	647	647	647	647
Ширина валків, мм	202	202	360	360	360
Максимальне зусилля пресування, кН	750	1000	1000…1200	1500	2000
Тип пристрою захисту валків від перевантаження	механічний	механічний	механічний	механічний	гідравлічний
Потужність приводу пресу, кВт	18,5	55,0	55,0; 75,0	75,0	110,0
Потужність приводу підпресовника, кВт	-	-	-	15,0	22,0
Частота обертання валків, $хв^{-1}$	1,8…4,6	6,0…9,8	6,0…9,8	6,0…9,8	6,0…9,8
Продуктивність, т/годину	0,50…4,50	2,25…13,75	6,6…24,8	6,6…24,8	6,6…24,8
Маса, кг	4000	7200	7800	12000	14500
Показники ефективності					
Питоме зусилля пресування, максимальне *Pu*, кН/см	37,13	49,5	33,3…36,0	41,7	55,5
Питома енергоємність *Eu*, кВт×годину/(т×годину)	4,1…10,3	4,0…24,4	3,0…11,36	3,0…11,36	4,4…16,7
Питома металоємність *Gu*, т/(т×годину)	1,6…8,0	0,5…3,2	0,3…1,2	0,5…1,8	0,6…2,2

Наведені показники дозволяють виконати порівняльний узагальнений аналіз ефективності валкових пресів ІЧМ з пресами інших розробників, що аналізуються в роботі (рис. 1.31-1.36).

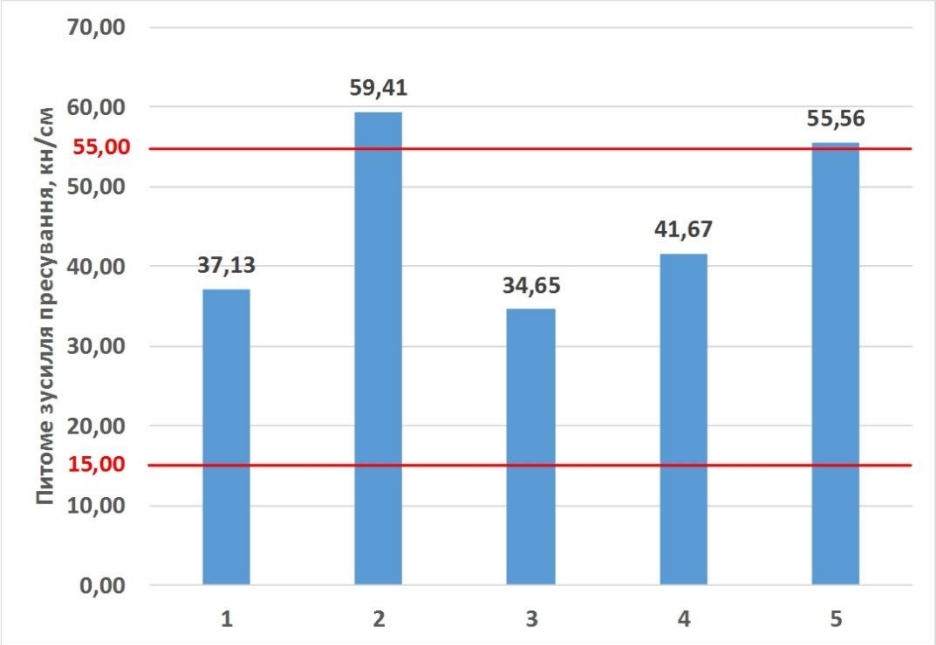


Рисунок 1.31 – Питоме зусилля пресування P_u пресів для брикетування конструкції ІЧМ
1 – ПБВ-500/202-750-М; 2 – ПБВ-647/202-1000-М; 3 – ПБВ-647/360-1200-М; 4 – ПБВ-647/360-1500-М-П; 5 – ПБВ-647/360-2000-Г-П

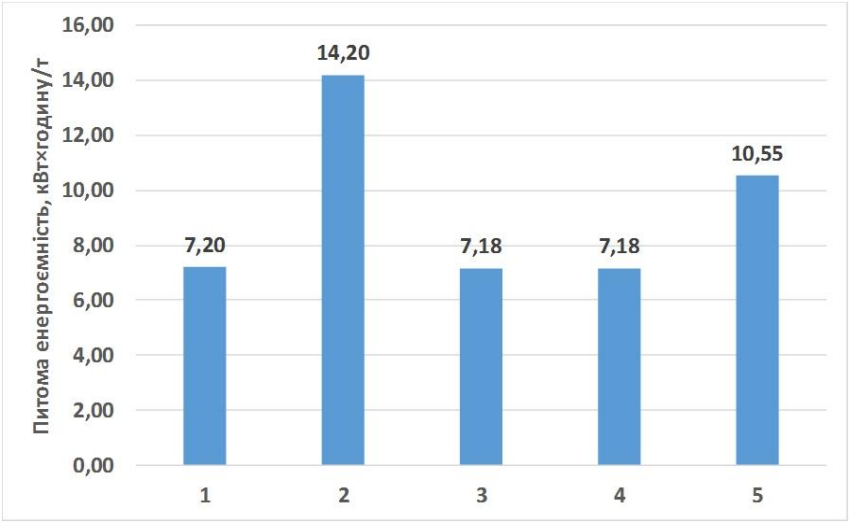


Рисунок 1.32 – Питома енергоємність E_u пресів для брикетування конструкції ІЧМ
1 – ПБВ-500/202-750-М; 2 – ПБВ-647/202-1000-М; 3 – ПБВ-647/360-1200-М; 4 – ПБВ-647/360-1500-М-П; 5 – ПБВ-647/360-2000-Г-П

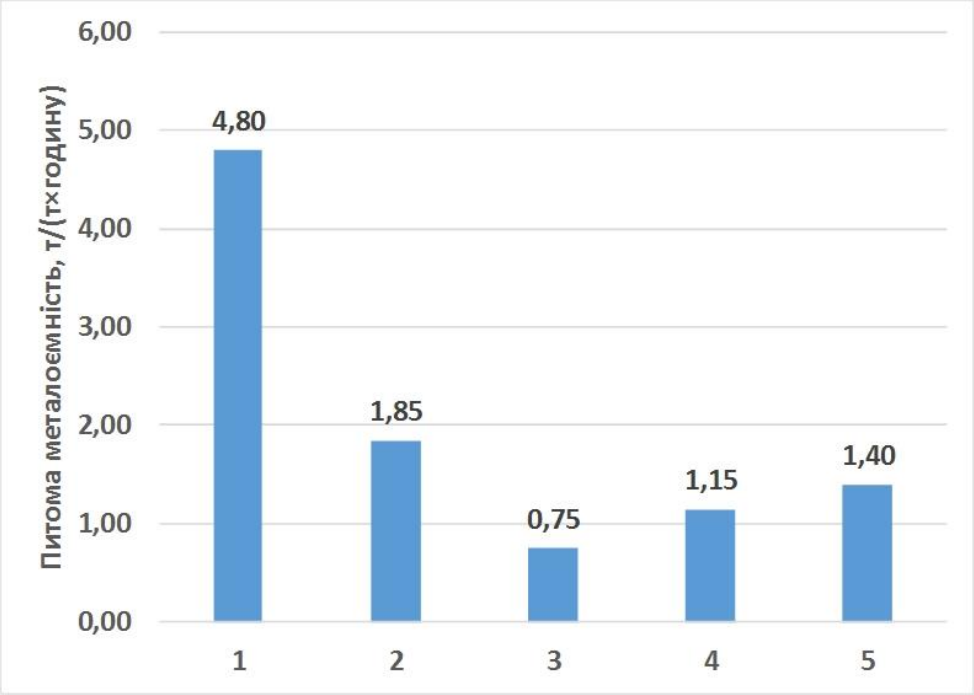


Рисунок 1.33 – Питома металоємність G_u пресів для брикетування конструкції ІЧМ
1 – ПБВ-500/202-750-М; 2 – ПБВ-647/202-1000-М; 3 – ПБВ-647/360-1200-М; 4 – ПБВ-647/360-1500-М-П; 5 – ПБВ-647/360-2000-Г-П

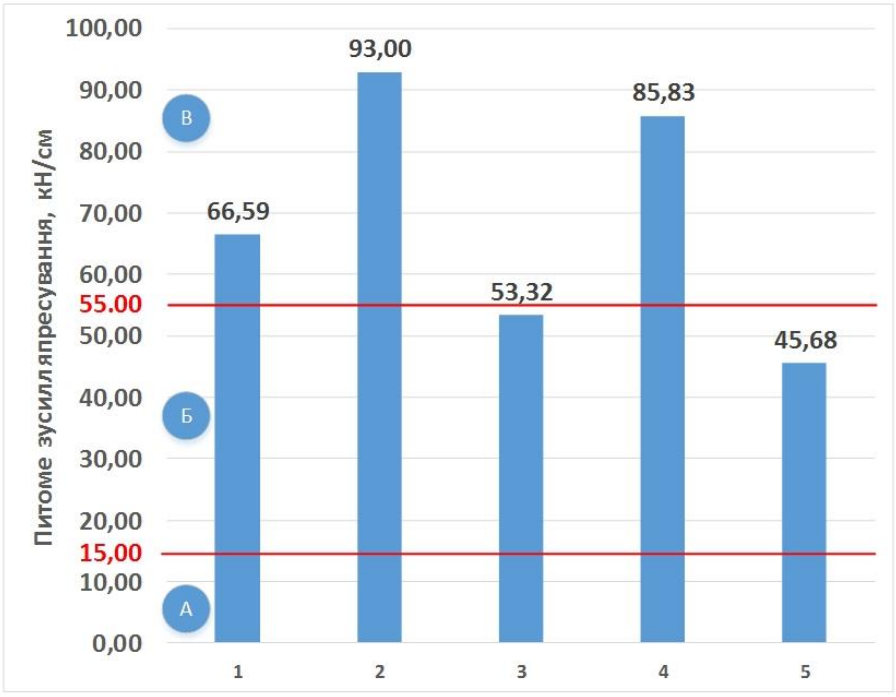


Рисунок 1.34 – Середні значення питомого зусилля пресування P_u пресів для брикетування
1 – K.R. KOMAREK Inc.; 2 – ЗАТ Спайдермаш; 3 – Верех; 4 – Luoyang Zhongyuan Mining Machine Manufacture Co., Ltd; 5 – ІЧМ
А – діапазон низького тиску пресування; Б – діапазон середнього тиску пресування; В – діапазон високого тиску пресування

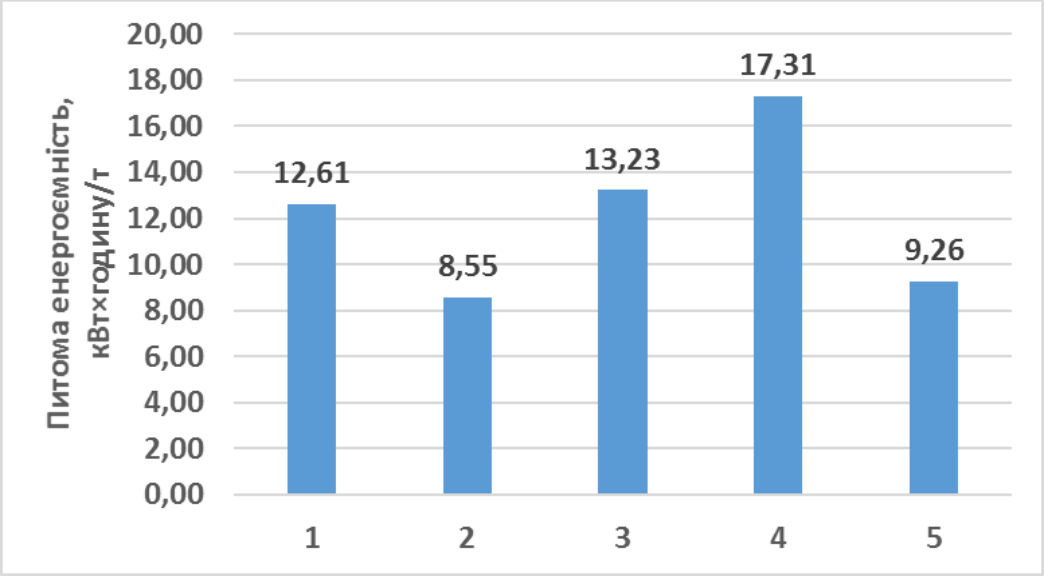


Рисунок 1.35 – Середні значення питомої енергоємності E_u пресів для брикетування
1 – K.R. KOMAREK Inc.; 2 – ЗАТ Спайдермаш; 3 – Верех; 4 – Luoyang Zhongyuan Mining Machine Manufacture Co., Ltd; 5 – ІЧМ

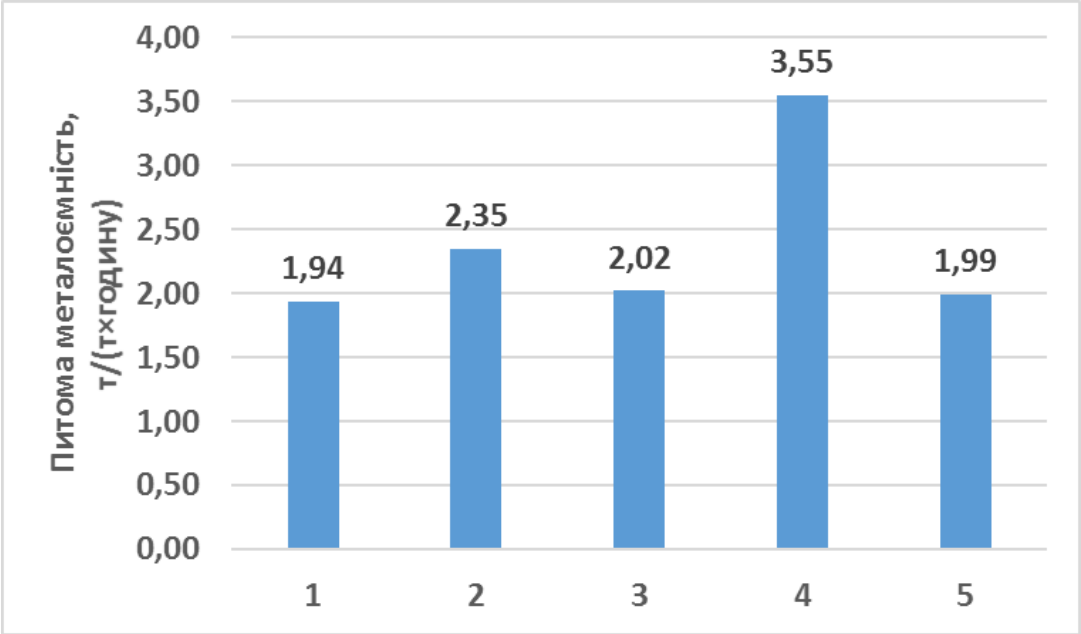


Рисунок 1.36 – Середні значення питомої металоємності G_u пресів для брикетування
1 – K.R. KOMAREK Inc.; 2 – ЗАТ Спайдермаш; 3 – Верех; 4 – Luoyang Zhongyuan Mining Machine Manufacture Co., Ltd; 5 – ИЧМ

Для пресів фірми Koeppern у відкритих джерелах присутні дані, які дозволили визначити лише один з показників ефективності – питоме зусилля пресування, середнє значення якого, та для кожного пресу в окремості, для

всього модельного ряду брикетних пресів даного виробника перевищує 100 кН/см. Для інших, з розглянутих виробників, виконано розрахунки за результатами яких на рис. 1.36-1.38 представлені середні значення показників ефективності валкових пресів для брикетування, технічні дані яких наведені в табл. 1.2-1.7.

Порівняльний аналіз діаграм, представлених на рис. 1.36-1.38, вказує на те, що, за середнім значенням показників питомого зусилля пресування P_u валкові преси ІЧМ уступають конкурентам та не досягають показників високого тиску пресування. Разом з тим, за показниками питомої енергоємності E_u та металоємності G_u, які є відносними величинами, що визначаються принциповим конструктивними та технічними рішеннями, валкові преси ІЧМ мають одні з найкращих показників [56].

Наведений аналіз дає підстави для того, щоб для умов вітчизняного виробництві прийняти прес конструкції ІЧМ у якості базової моделі для подальшого розвитку його модифікацій.

При цьому до уваги необхідно прийняти особливості валкових пресів, які полягають в наступному:

- горизонтальний або вертикальний напрям процесу ущільнення в залежності від розташування валків;
- формуючі елементи на робочих поверхнях валків розробляються та виготовляються індивідуально по узгодженню з врахуванням умов подальшого використання брикетів;
- преси мають два можливих варіанти подачі матеріалу до осередку деформації – гравітаційний та за допомогою шнекового підпресовника;
- привод пресу оснащений управляючими пристроями для регулювання частоти обертання валків;
- змінні пресуючі деталі валків та шнеки підпресовників можуть бути вироблені із зносо- та корозійностійких сплавів.
- деякі моделі пресів мають консольне розташування валків для можливості бистрої заміни пресуючих елементів.

Виконаний аналіз дозволяє зробити наступні висновки щодо загального конструктивного рішення валкових пресів. Сучасний валковий прес для брикетування сировинних матеріалів для металургійного виробництва, має задовольняти наступним вимогам:

- для зниження металоємності конструкції бажане симетричне розташування пресуючих поверхонь відносно підшипникових опор, але при необхідності частої зміни конфігурації пресуючих поверхонь можливе консольне розташування валків;
- дозволяти досягати тиску пресування в діапазоні ≈50…200 МПа, або розподільного зусилля пресування від 25 до 200 кН/см;
- мати рамну конструкцію максимально близьку до валкових пресів конструкції ІЧМ;
- бути оснащеним гідравлічним, або механічним (взаємозамінюємими) пристроями для захисту валків від перенавантаження;
- передбачати, для умов брикетування матеріалів з малою насипною щільністю, оснащення пристроєм для попереднього ущільнення шихти – (підпресовник) шнекового типу.

1.4. Аналіз досліджень щодо визначення раціональних силових технологічних та конструктивних параметрів валкових пресів

Узагальнення інформації, присутньої у відкритих джерелах, вказує на те, що сучасні дослідження 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, та базуються на принципах теорії пресування та прокатки порошків [14,18,20,57-76]. Суттєвий обсяг досліджень в даному напрямку виконаний спеціалістами ІЧМ [1,29, 77-88].

На сьогодні можна виділити три основних наукових теоретичних підходи до дослідження параметрів брикетування в осередку деформації валкового преса:

1. Модель Йохансона [57-60]. На початку 1960-х років, зі зростанням об’ємів застосування валкових пресів в процесах прокатки порошкових металів та брикетування дрібнофракційних матеріалів, виникла потреба в створенні математичної моделі, що описує взаємозв’язок між властивостями матеріалу, що ущільнюється, конструктивними та енергосиловими параметрами валкових пресів. Йохансон був одним з перших, хто розробив математичну модель для визначення параметрів брикетування в валковому пресі з урахуванням геометричних параметрів валків та експериментально визначеними параметрами матеріалу, що ущільнюється.

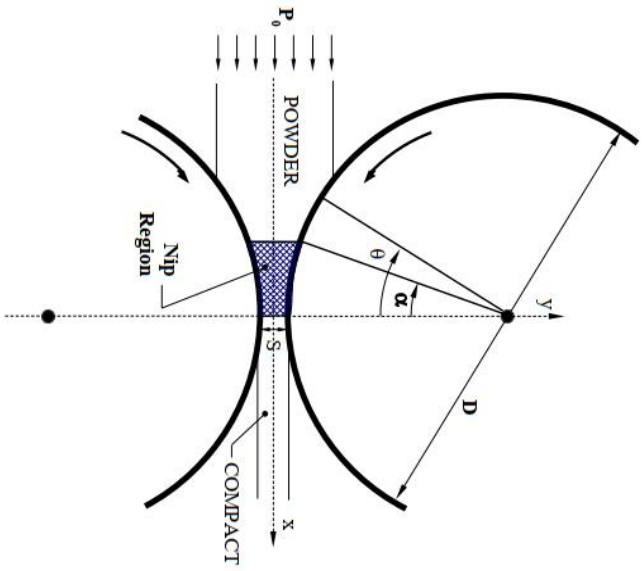


Рисунок 1.37 – Схема осередку деформації, модель Йохансона

Модель Йохансона описує функцію напруження щодо геометричних параметрів і закони пластичного виходу матеріалу, що зазнає постійної деформації зсуву між валками. Його теорія базується на тому, що процес можна поділити на окремі зони: подачі; ковзання; рівноваги; ущільнення (рис.1.39). Після ущільнення матеріал потрапляє у область виходу з міжвалкового простору, де його швидкість більша, ніж у валків. На цьому етапі в брикеті відбувається всебічне розширення. Йохансон зазначає, що це розширення досить невелике і вважається незначним, тому в його теорії не приймається до уваги. Але, як вказує

практичний досвід, існує цілий клас матеріалів для яких величина пружної післядії складає більше 10%, що може суттєво впливати на показники якості брикетів – цілісність, рінощільність, міцність. Кількість матеріалів з чітко вираженою пружною післядією, які переробляються методом брикетування щорічно зростає. Тому дослідження цього явища в процесі брикетування, та його впливу на параметри брикетів є актуальними.

В моделі Йохансона геометричні параметри формуючих елементів враховуються опосередковано шляхом заміни профільованого валка гладким наведеного діаметру. Такий підхід не дозволяє визначити реальну картину розподілу напружень та ущільнення в різних точках осередку деформації, що вносить неточність у визначення енергосилових параметрів брикетування та не дає змоги дослідити процеси на контактній поверхні валків.

Також в моделі Йохансона є декілька інших припущень:

- матеріал, що ущільнюється, є ізотропним, фрикційним та когезійним;
- матеріал, що ущільнюється перетворюється на компактне тіло за рахунок відносно тривалих деформацій зсуву;
- площа робочої поверхні валків значно більша за контактну поверхню з ущільнюваним матеріалом;
- робочі поверхні валків приймаються абсолютно жорсткими;
- розглядається процес плоскої деформації – шари матеріалу в напрямі поперечному напряму ущільнення не перемішуються;
- тертя на контактних поверхнях валків з ущільнюваним матеріалом відповідає закону Кулона;
- вага стовпу матеріалу при примусовій подачі є незначною і фактично має малий вплив на параметри ущільнення.

Враховуючи наведені припущення слід відзначити, що на сьогодні, маючи практичний досвід використання валкових пресів, впевнено можна стверджувати, що більшість з них є доволі вірними, та не впливають на якість розрахунків та їх відповідність реальним параметрам процесу. Але при використанні механізмів для подачі матеріалу та його попереднього ущільнення

все ж таки слід враховувати вплив живильних механізмів на енергосилові та технологічні параметри процесу брикетування.

Модель Йохансона не враховує вплив зміни швидкості деформації за рахунок зміни частоти обертання валків, що як відомо з практики суттєво впливає на енергосилові показники процесу брикетування та якість готової продукції, в першу чергу на щільність брикетів. Також дана модель не враховує зміни величини коефіцієнтів тертя матеріалу з ростом величини ущільнення, що суттєво впливає на точність визначення силових параметрів процесу.

Незважаючи на наявність недоліків найважливішим результатом створення моделі Йохансона є те, що вона дозволила визначити характерні кутові характеристики процесу ущільнення в валках, особливо кута пресування α_{pr}, які часто використовується як граничні умови для інших аналітичних та чисельних моделей.

2. **Метод смуг** розроблений Зібелем та фон Карментом для формування листового металу основні засади якого розглянуті в роботі [20]. Каташинський В.П. розвинув даний метод, застосувавши його до дослідження параметрів ущільнення металевих порошків у гладких валках [89]. Основною відмінністю застосування методу смуг для дослідження процесу ущільнення дрібнофракційних матеріалів в валках є прийнятий критерій плинності (рівняння деформації) матеріалу. Метод смуг уявляє собою аналітичну модель ущільнення дрібнофракційного матеріалу, яка враховує його фізико-механічні властивості та рівняння рівноваги виділеного об’єму матеріалу, що знаходиться під дією сил пресування в осередку деформації (рис. 1.40).

Перевага цієї моделі полягає в тому, що дає змогу визначити два головні напруження, на відміну від моделі Йохансона, яка дозволяє визначити лише середнє напруження в матеріалі. Дана модель може також враховувати такі характеристики дрібнофракційних матеріалів, як зчеплення та загальне тертя між частинками. Однак у міру реалізації більш складних характеристик поведінки матеріалу здатність коректного аналітичного вирішення задачі дослідження процесу ущільнення матеріалу суттєво зменшується. При цьому дана

математична модель дозволяє прогнозувати взаємозв'язок між величиною ущільнення, тиском пресування, напруженням в ущільнюваній шихті, та відкриває можливість розробки методів прогнозування властивостей брикетів таких, як щільність та міцність.

Перевагою методу смуг є те, що він дозволяє врахувати, з незначним відхиленням, реальну геометрію пресуючої поверхні валків.

Недоліками метода смуг, як і метода Йохансона є те, що він не враховує зміну коефіцієнтів тертя в ущільнюваному матеріалі із зростанням тиску пресування, а також вирішується плоска задача аналізу напружено-деформованого стану, яка потребує прийняття припущень для визначення енергосилових параметрів процесу брикетування.

При наявності недоліків, метод смуг продовжує розвиватись. Причиною тому є його гнучкість та простота програмної реалізації.

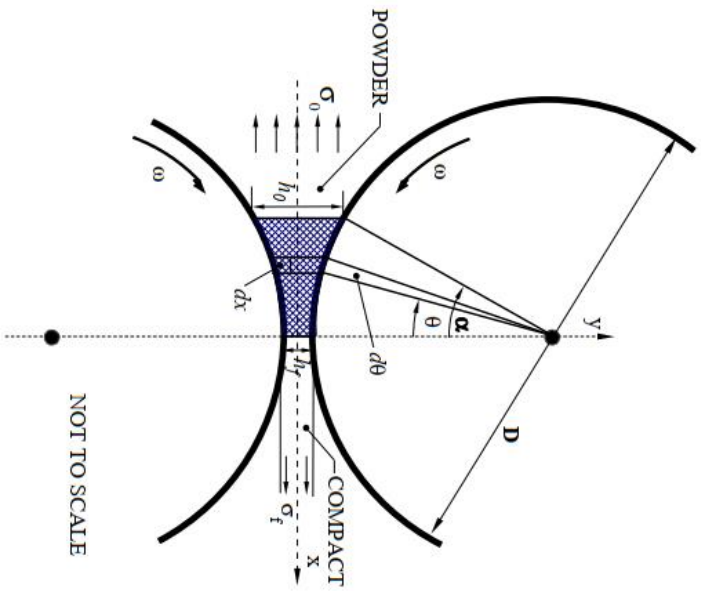


Рисунок 1.38 – Схема осередку деформації, метод полос

3. Метод скінчених елементів (МСЕ) є доволі добре розробленим та розповсюдженим у різних сферах механіки [90-92]. Він виглядає доволі привабливим, оскільки дозволяє дослідити поведінку порошку та трибологічні умови. Хоча для цього потрібні дорогі комп'ютерні та програмні ресурси, він має

багатообіцяючу здатність детально моделювати ущільнення дрібнофракційного матеріалу в валках і, як результат, покращує оптимізацію технологічного процесу та обладнання. Також існує проблема того, що даний метод на сьогодні не достатньо програмно та теоретично відпрацьований для умов дослідження багатокомпонентних сумішей, в тому числі, для дрібнофракційних шихт, в яких присутні різні компоненти, фракції та сполучна речовина, в тому числі рідка фаза.

Крім того, результати обчислення з використанням метода скінчених елементів в значній мірі залежать від специфічних експериментальних даних, для визначення яких необхідне досить дороге спеціалізоване обладнання. Відомі роботи по застосуванню даного методу для дослідження параметрів брикетування, в яких досліджено вплив конфігурації формуючих елементів на енергосилові параметри та розподіл напружень в ущільнюваній шихті.

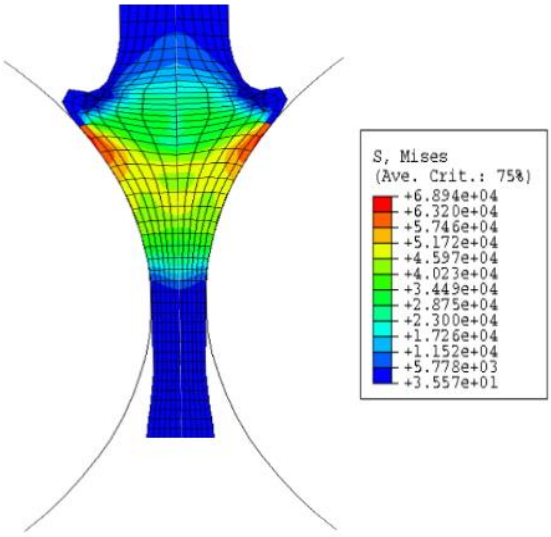


Рисунок 1.39 – Осередок деформації, МСЕ

Окрім наведених трьох основних математичних моделей процесу брикетування в валках на сьогодні відомі та находять свій подальший розвиток гібридні методи, які базуються на компонуванні, трансформації та доповненні вказаних раніше основних методів. Саме такі методи розвинуті в роботах спеціалістів ІЧМ.

В роботах Носкова В.О., Маймура Б.Н., Петренко В.І. та Лебедя О.Т. розроблено методи дослідження параметрів ущільнення та визначення енергосилових параметрів брикетування [1,78-80,82-86]. Базові принципи при досліджені осередку деформації в даних роботах дуже близькі до метода Йохансона. Але дані дослідження відрізняють наступні нові наукові результати:

- При визначенні геометричних параметрів (кута захоплення матеріалу валками, кута пресування, кутів нахилу ліній ковзання матеріалу) осередку деформації враховані геометричні параметри формуючих елементів.
- При розрахунку параметрів брикетування врахований вплив конфігурації формуючих елементів на величину ущільнення матеріалу та розподіл щільності в брикетах. Однак прийняте, що ущільнення матеріалу відбувається за рахунок горизонтальних складових тиску пресування, перпендикулярних напрямку потоку матеріалу в валках. Це вносить деяку неточність у визначення моменту пресування.
- Експериментально для декількох матеріалів досліджено влив швидкості деформації на щільність брикетів.
- Запропонований теоретичний опис процесу витиснення матеріалу з осередку деформації за рахунок протитечії в процесі захоплення матеріалу валками.

В роботах Муравьової І.Г., Кукушкіна О.Н., Головко В.І. [29,81] досліджено осередок деформації в валковому пресі з зубчасто-жолобчастими формуючими елементами:

- На базі трансформованого методу полос, запропоновано рівняння для визначення величини зусилля пресування.
- Досліджено періодичний характер зміни величини зусилля пресування, викликаний складним геометричним профілем пресуючих поверхонь валків.

Автором даної дисертаційної роботи раніше розроблена математична модель осередку деформації [87], яка базується на елементах теорії Йохансона, методу полос, та розробках спеціалістів ІЧМ. Відмінною рисою даної моделі є те, що вона дозволила врахувати вплив конфігурації формуючих елементів на напружено-деформований стан шихти в осередку деформації, визначити картину

розподілу та величини контактних напружень за дугою пресування, та врахувати вплив конфігурації формуючих елементів на величину зусилля та моменту пресування.

Останнім часом в ІЧМ ведуться дослідження пресового обладнання та технологій брикетування дрібнофракційних шихт в валкових пресах за наступними напрямками:

- взаємозв'язок фізико-механічних шихт з параметрами ущільнення в процесі пресування [93-106];
- вплив конструктивних параметрів валків на енергосилові та технологічні параметри процесу брикетування [5-10,24,77,87,107,108].

Накопичення практичних і теоретичних досліджень дозволило виділити основні взаємопов'язані фактори, що впливають на процес брикетування (рис. 1.40). Як видно зі схеми (рис. 1.40), вибір конструктивних та силових параметрів пресового обладнання тісно пов'язаний з особливостями технології виробництва брикетів. Велика кількість факторів вказує на те, що розробка раціональної конструкції сучасного валкового преса для брикетування уявляє собою багатофакторну задачу, яка має вирішуватись відповідними методами.

Як показує аналіз літературних [1-10, 13-23, 73-88, 107, 108] джерел, на сьогодні виконані спроби створити системний підхід до визначення енергосилових та окремих конструктивних параметрів, насамперед, геометричних параметрів валків та формуючих елементів. При цьому не розробленими є критерії та показники раціональності конструкції валкових пресів, їх окремих вузлів та елементів.

Щодо взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів невизначеними, або не достатньо дослідженими є наступні питання:

- вплив швидкості деформації шихти в валках на показники якості брикетів та силові параметри процесу пресування;
- вплив величини зносу пресуючих поверхонь валків на якість брикетів та можливості подовження ресурсу експлуатації зношених валків шляхом регулювання режимів пресування;

- влив конфігурації формуючих елементів та фізико-механічних властивостей шихти на розвиток пружної післядії в брикетах.

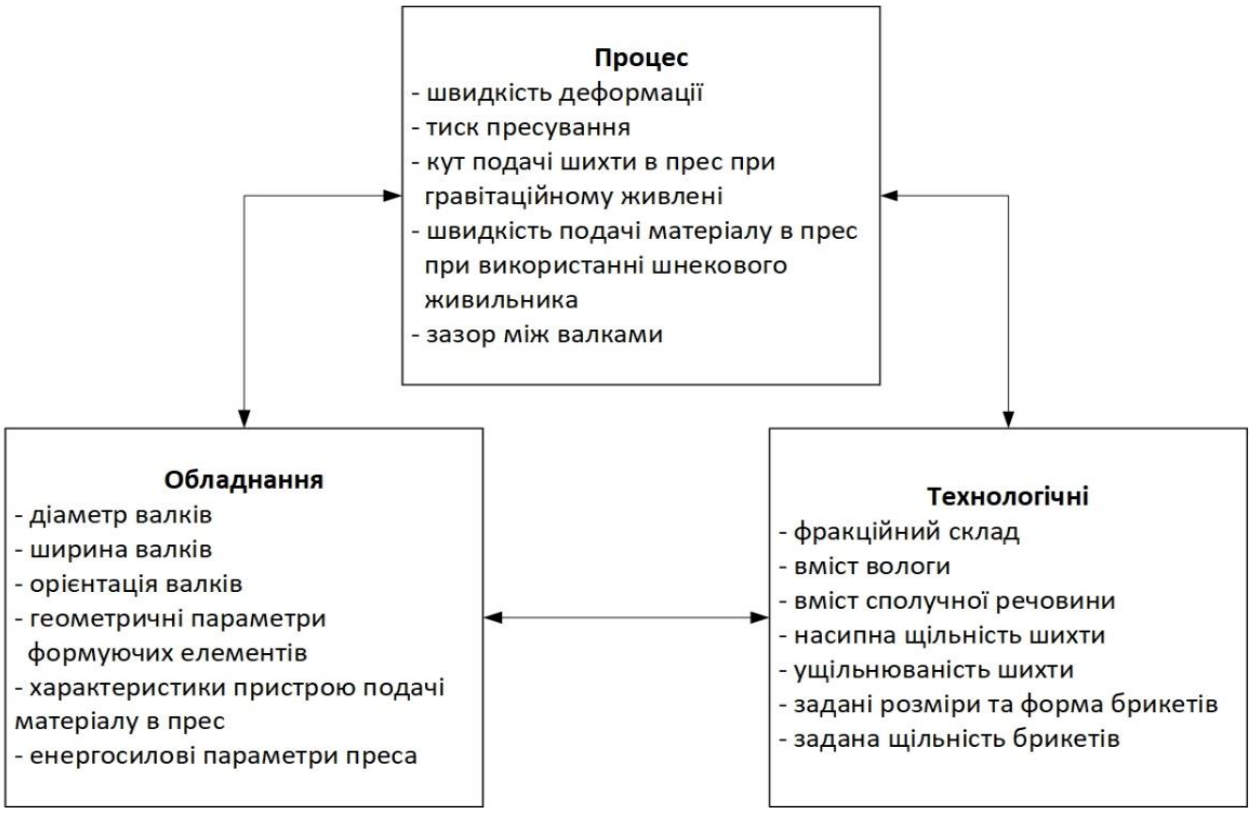


Рисунок 1.40 – Основні фактори, що впливають на ефективність брикетування дрібнофракційних шихт у валковому пресі

В даний час для розробки конструкції валкових пресів, як і більшості сучасних промислових машин і агрегатів, активно застосовуються системи автоматизованого проектування (САПР) – в основному SolidWorks, Компас та AutodeskInventor.

Для створення раціональної конструкції валкового преса наявність стандартного набору засобів САПР є необхідним, але не достатньою умовою в зв'язку з необхідністю вирішення вузькоспеціалізованих завдань, зумовлених технологічними особливостями, умовами виготовлення, монтажу та експлуатації, властивими даному класу машин.

На це вказує і те, що в процесі розвитку технологій і машин для брикетування розроблений і продовжує удосконалюватися цілий клас методів і математичних

моделей, що дозволяють здійснювати прогноз, оцінку і вибір раціональних енергосилових і технологічних параметрів процесу брикетування, конструкції окремих деталей пресового устаткування і режимів його експлуатації. Розвитку таких методів приділяється значна увага фахівців Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ).

Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених дослідженню процесу брикетування в валкових пресах і вдосконалення машин даного класу, процес створення конструкції преса носить ітеративний характер проб і помилок. Це обумовлено багатофакторністю процесу і технології брикетування.

Часом умови отримання якісних брикетів і забезпечення нормальних режимів роботи пресового обладнання в межах його технічних характеристик входять у взаємну суперечність. Це вимагає з одного боку коригування технології брикетування, а з іншого внесення змін у конструкцію преса.

В даний час відсутня структурована система, методологія або алгоритм, які б були чіткою інструкцією до покрокового проектування раціональної конструкції валкового преса з урахуванням технологічних особливостей процесу брикетування.

Більшість досліджень зосереджено на вирішенні конкретних завдань, зокрема, визначенні енергосилових параметрів брикетування, оптимізації конфігурації пресуючих поверхонь і т. п. 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.

Такий висновок підтверджується тим, що на сьогоднішній день не існує самостійних або інтегрованих в відомі САПР програмних засобів, що дозволяють з урахуванням всіх технологічних особливостей, проводити розробку і моделювання всього життєвого циклу валкових брикетних пресів. Такі роботи виконуються з використанням розрізнених програмних засобів, кожне з яких вирішує лише вузьку конкретну задачу, що приводить до значного збільшення витрат часу і ресурсів. Це

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

Для розробки нових підходів до створення валкових пресів проведено аналіз и узагальнення відомих процедур проектування механічного обладнання [109-113].

Ефективна розробка машини / агрегату, крім базових процедур проектування, повинна враховувати технологічні особливості реалізованого за участю цієї машини виробничого процесу. Проектування валкового преса може бути представлено у вигляді трансформації, яка вже стала класичною, схеми системного проектування (рис. 1.41).

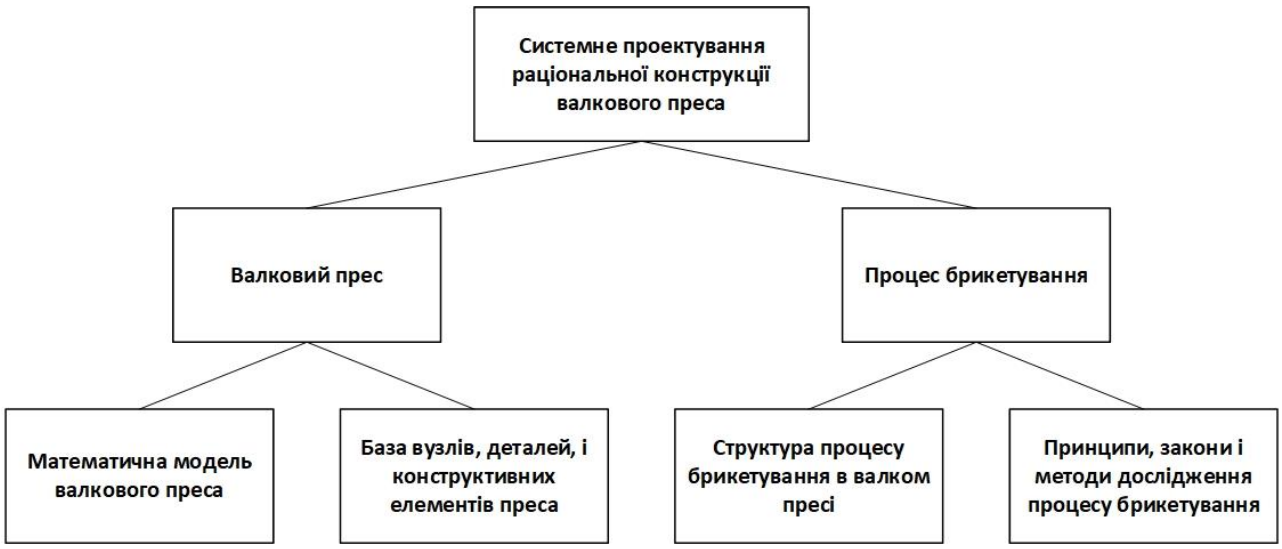


Рисунок 1.41 – Основні складові системного проектування валкового преса

Перспективним для вирішення такого завдання є застосування відомих в різних галузях знань структурно-параметричного синтезу і аналізу та розвиток засобів і методів формування нових моделей валкових пресів за модульним принципом, з урахуванням вже відомих розробок.

Аналізуючи викладене можна зробити висновок, що в ході раніше виконаних досліджень, результати яких наведені в джерелах технічної інформації, вирішувалися приватні питання, пов'язані з розробкою конструкцій і вузлів валкових пресів для конкретних технологічних умов отримання брикетів, визначення енергосилових параметрів процесу брикетування. Вирішення цих

приватних питань підготувало базу для вирішення завдання розвитку системного підходу до вибору раціональних конструктивних рішень валковий пресів, які компонуються за модульним принципом.

Це дозволяє сформулювати основні задачі роботи:

- розробити системний підхід до вибору раціональних конструктивних параметрів валкових пресів та до їх проектування за модульним принципом;
- розробити аналітичний апарат для прогнозування впливу швидкості деформації на параметри ущільнення дрібнофракційних шихт в валкових пресах;
- виконати експериментальні та аналітичні дослідження впливу конфігурації формуючих елементів та властивостей матеріалу що брикетується на пружну післядію в брикетах;
- розробити системний підхід до прогнозування та виконати дослідження впливу зносу пресуючих поверхонь валків на енергосилові та технологічні параметри брикетування з врахуванням конфігурації формуючих елементів;
- розробити метод вибору раціональної конфігурації формуючих елементів з врахуванням багатофакторності параметрів процесу брикетування;
- розробити технічні рішення щодо створення вдосконалених конструкцій валкових пресів для брикетування та їх окремих деталей та вузлів.

Висновки

1. Виконано аналіз конструктивних і технологічних параметрів валкових пресів для переробки дрібнофракційних сировинних матеріалів. Узагальнена 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.
2. 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.

3. Узагальнення інформації присутньої у відкритих джерелах вказує на те, що сучасні дослідження 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.
4. 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. Тому, особливу актуальність має дослідження та аналіз таких показників процесу брикетування та стану пресового обладнання як: взаємозв'язок зносу пресуючих поверхонь валків на енергосилові та технологічні параметри процесу брикетування; вплив швидкості деформації на якість брикетів і силові параметри процесу; взаємозв'язок властивостей шихти, конфігурації формуючих елементів та пружної післядії на якість брикетів.

РОЗДІЛ 2
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗНОСУ БАНДАЖІВ ВАЛКОВИХ ПРЕСІВ НА ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ БРИКЕТУВАННЯ

2.1. Аналіз і оцінка факторів, що визначають знос бандажів валків брикетних пресів

2.1.1. Узагальнення інформації про конструкцію та досвід експлуатації валків брикетних пресів

Валкові преси використовують для отримання брикетів з широкої гами матеріалів, що істотно відрізняються між собою за фізико-механічними властивостями. При цьому з ростом твердості частинок матеріалу, що переробляється збільшується інтенсивність зносу робочих поверхонь валків, що негативно відбивається на якості брикетів та параметрах процесу брикетування. Аналіз робіт з теорії тертя і зношування [114-119] показує, що найбільш розвиненими є матеріалознавчі аспекти прогнозування зносу, методи захисту та відновлення деталей промислового обладнання. В області процесів і машин обробки матеріалів тиском традиційно найбільш використовується підхід до збільшення ресурсу експлуатації робочих органів обладнання за рахунок застосування зносостійких матеріалів. Теж саме відноситься і до бандажів валків брикетних пресів. Однак, незалежно від того, з якого матеріалу виготовлені бандажі, в процесі експлуатації відбувається знос їх робочих поверхонь. Тому актуальним є питання, до якої міри зносу можна експлуатувати бандажі, дотримуючись роботи преса в межах заданих технічних характеристик і забезпечуючи формування брикетів задовільної якості. Важливо також визначитися, як змінити режим роботи преса при наявності зносу бандажів, регламентувати їх заміну, прийоми ремонту та відновлення.

В даний час даних про режими експлуатації валкових пресів, періодах і параметрах експлуатації змінних кільцевих бандажів в реальних виробничих

умовах вкрай мало, вони, як правило, короткі і не систематизовані. Це ускладнює розробку раціональних прийомів експлуатації пресів на різних стадіях зносу робочих поверхонь валків, вибір оптимальних геометричних параметрів формуючих елементів, матеріалу і способів відновлення бандажів.

Для розробки ефективних методів продовження терміну служби бандажів необхідно ретельно проаналізувати механізм їх зносу. У цьому плані значний інтерес представляють дослідження, виконані І. К. Білим [120,121].

В роботі [121] автором виділено п'ять основних факторів, що впливають на зношування бандажів валкових пресів: 1. абразивні властивості шихти і вміст у ній речовин, що сприяють руйнуванню поверхневого шару металу; 2. питомий тиск при брикетуванні; 3. якість матеріалу бандажів і його термічна або термохімічних обробка; 4. внутрішні напруження в поверхневому шарі формотворчих елементів бандажів, що виникають в результаті їх посадки на валок; 5. конфігурація формуючих елементів.

Вибір режимів брикетування та матеріалу для виготовлення бандажів вимагає ретельного дослідження властивостей шихти, що брикетується. Співвідношення між твердістю пресуючої поверхні і частинок шихти визначає зносостійкість пресуєуючого інструменту. На абразивні властивості шихти впливає твердість, розмір і форма її частинок, гранулометричний склад, значення коефіцієнтів тертя.

За умовами зносу пресуючих поверхонь в осередку деформації валкового преса умовно можна виділити дві області. Межа, що розділяє між собою ці області, визначається кутом пресування. В області I, розташованої до кута пресування, переважають відносні тангенціальні переміщення частинок шихти вздовж поверхні валків; в області II – нижче кута пресування – починається формування брикетів з переважанням відносного зсуву між частинками шихти. Як наслідок, в області I переважає абразивний знос поверхні бандажа – дряпання поверхні частинками шихти, тоді як в області II точкові вдавлення частинок шихти, накопичуючись, ведуть до виникнення втомних явищ в поверхневих шарах металу [122, 123].

На зносостійкість, ремонтопридатність, технологічні та експлуатаційні характеристики валків істотно впливає їх конструктивне виконання. Відомі три основних типи конструктивного виконання валків: цільні, з кільцевими бандажами і з сегментами.

Як показано в розділі 1.2.5 найбільшого поширення на практиці отримали валки, оснащені кільцевими бандажами.

На знос та експлуатаційні показники бандажів впливають умови їх закріплення на валках. Відомі варіанти кріплення бандажів на валок за допомогою гарячої посадки і різного роду кріпильних елементів. При посадці бандажа на валок з натягом в них виникають напруження, які діють на межі бандажа та місця його кріплення (ступиці).

Наявність контактних напружень на межі бандажа та деталі, яка сполучається з ним, призводить до виникнення статичних напружень розтягування в бандажі, які досягають свого максимуму на внутрішній поверхні. Тиск пресування являє собою періодичне навантаження, що призводить до виникнення втомних явищ в металі бандажа. Це навантаження характеризується виникненням високих значень напружень з малою амплітудою на внутрішньому діаметрі та нижчих значень напружень, але з більшою амплітудою на зовнішньому діаметрі бандажа. В цілому, ці напруження мають малу частоту та близькі до статичних. В результаті того, що бандаж, посаджений на вал з натягом, знаходиться під дією внутрішніх напружень, на його поверхні виникають мікротріщини, що прискорює абразивне зношування. При збільшенні натягу або твердості матеріалу після гартування величина напружень в матеріалі бандажа може досягати межі текучості. В цьому випадку при повному охолодженні зібраного валка є небезпека руйнування бандажа. Тому на практиці кращими є варіанти кріплення бандажів без використання посадок в гарячому стані з натягом. До таких варіантів відносять кріплення за допомогою клинових кілець, шпонок, болтових і замкових з’єднань. В цьому випадку зменшується негативний вплив внутрішніх напружень, що виникають в бандажах від посадки на вал, на їх експлуатаційні характеристики.

Розширення номенклатури матеріалів, що переробляються методом брикетування в валкових пресах, збільшує вимоги до зносостійкості валків. В основному це завдання вирішується формуванням або нанесенням зносостійкого шару на робочу поверхню валка.

При використанні звичайних методів отримання литої деталі або заготовки властивості матеріалу пресуючого інструменту приблизно однакові по всьому об'єму. Величина зносостійкого шару в даному випадку незначна і, в основному, визначається методами термообробки. Отримання такого пресуючого інструменту не вимагає великих фінансових витрат, але і його зносостійкість, відповідно, невисока. Сучасні методи формування зносостійкого шару деталі, такі, як відцентрове лиття, наплавлення і методи порошкової металургії (гаряче ізостатичне пресування, напилення і т.п.) більш дорогі. При цьому методи наплавлення та порошкової металургії дозволяють здійснювати повторне нанесення зносостійкого покриття, що істотно збільшує ресурс експлуатації деталі.

Провідні виробники валкових пресів виготовляють бандажі з сталей та інших матеріалів з високою твердістю (56...58 HRC) і ударною в'язкістю, що дозволяє витримувати великі деформації без виникнення тріщин.

В роботах [124-127] розглянуті питання зносостійкості і вибору матеріалів для виготовлення бандажів. В роботі [124] на основі результатів теоретичних досліджень осередку деформації дрібнофракційних шихти в валковому пресі розроблена методика експериментальних досліджень матеріалів для виготовлення пресуючої поверхні валків. За допомогою лабораторної установки, змонтованої на базі гідравлічної випробувальної машини, досліджена зносостійкість ряду матеріалів з твердістю до 65...63 HRC, які можуть бути використані при виготовленні бандажів. Запропонована методика не дозволяє врахувати всі аспекти реального зносу бандажів. За словами самих її авторів, не розглянуто вплив величини зміни внутрішньої напруги, що виникає в формуючих елементах при брикетуванні шихти, на процес зносу.

Дослідження, описані в роботах [125,126], присвячені створенню зносостійких покриттів бандажів валкових брикетних пресів з використанням методів порошкової

металургії. Експериментально, в тму числі в промислових умовах, досліджена зносостійкість бандажів виготовлених з композитних матеріалів. З використанням методу скінченних елементів розроблено математичну модель формування властивостей зносостійкого покриття в процесі його виготовлення, яка включає аналітичні залежності між температурою, мікроструктурою та напружено-деформованим станом матеріалу.

Важливим етапом при розробці способів підвищення зносостійкості і ремонтопридатності бандажів валкових пресів є збір та узагальнення експериментальних даних про їх експлуатацію, а також розробка прогнозних методів оцінки зносу і його впливу на параметри брикетування.

У 2003 р. на ВАТ «Нікопольський завод феросплавів» (НЗФ) за участю фахівців ІЧМ був створений комплекс брикетування відсівів феросплавів (БОФ). Валковий прес, що входить до складу технологічної лінії комплексу, розроблений фахівцями ІЧМ і виготовлений Експериментально-виробничим підприємством інституту. Валки преса оснащені бандажами з зубчато-жолобчастою конфігурацією робочих поверхонь (рис, 2.1 а), що дозволяють отримувати брикети «пельменеподібної» форми. На рис. 2.1 б, в, показано зміна зовнішнього вигляду брикетів при наявності зносу бандажів.

Встановлено що, з ростом зносу бандажів знижується щільність і механічна міцність брикетів. Отже, одними з критеріїв, що вказують на необхідність проведення ремонтних робіт по відновленню або заміні бандажів, можуть бути показники якості брикетів. Про це свідчать і результати роботи [121], в якій наведена залежність міцності брикетів від ступеня зносу формуючих елементів:

$$P_{pr} = 162 - 0,41(\delta - 1,6)^2, \qquad (2.1)$$

де P_{pr} – міцність брикетів при роздавлюванні; δ – значення зазору між валками. Вираз (2.1) носить емпіричний характер і отримано для умов брикетування конкретної шихти.

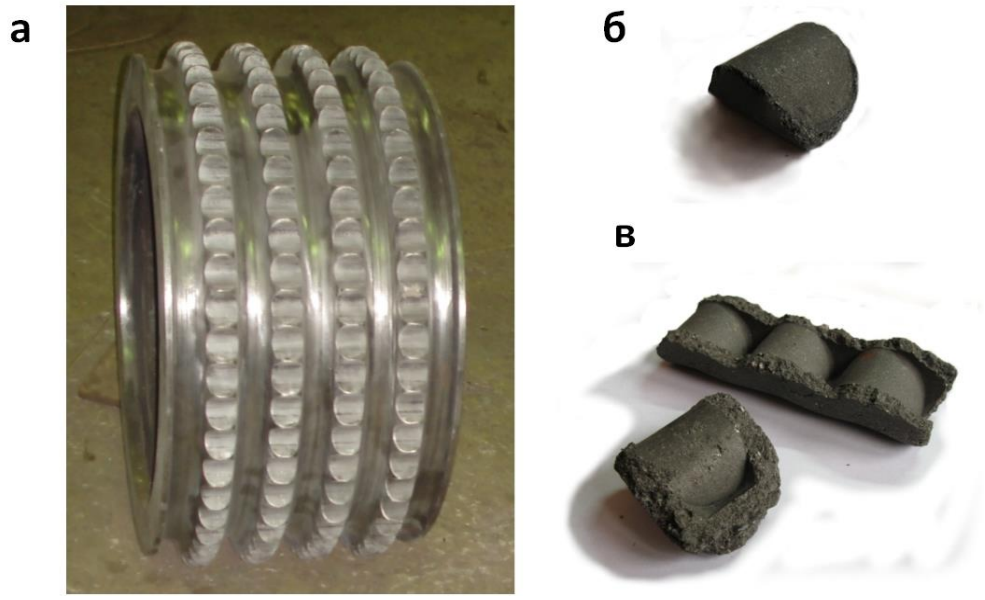


Рисунок 2.1 – Бандаж валкового преса, брикети
а – бандаж з зубчасто-жолобчастою формою пресуючої поверхні; б – брикет, отриманий на незношених бандажах; в – брикети, отримані на зношених бандажах

Отримані в процесі експлуатації преса в складі комплексу БОФ НЗФ експериментальні дані дозволили встановити картину зносу робочих поверхонь бандажів в виробничих умовах [127].

Як показує досвід, комплект бандажів зі сталі 40ХН з твердістю робочої поверхні 58...62 HRC, за період експлуатації до їх заміни, дозволяє виробити 1000...1500 т брикетів з відсіву силікомарганцю фракції -6 мм при використанні органічного сполучного. При цьому знос робочих поверхонь бандажів за період експлуатації складає до 5...8 мм на днищі і бічних поверхнях жолобів і до 4,5...5 мм на зубцях. В середньому, швидкість зносу бандажів складає від 3 до 12 мкм/год і відрізняється для різних ділянок поверхні бандажів. Відзначено відоме раніше явище нерівномірності величини зносу по ширині бандажа. Ряди формуючих елементів, розташовані ближче до середини валка, більш зношені, ніж крайні ряди. Дане явище пояснюється тим, що при гравітаційній подачі шихти в прес на середню частину

валків надходить більше шихти, внаслідок чого центральні формуючі елементи краще заповнюються шихтою, що забезпечує більше ущільнення брикетів. Найгірше заповнення в крайніх рядах формуючих елементів пов'язане як з умовами подачі, так і з впливом тертя шихти об стінки завантажувального пристрою.

Раніше спеціалістами ІЧМ виконані дослідження, в яких запропоновані розрахункові схеми, які описують процес ущільнення дрібнофракційних шихт з урахуванням всіх складових тиску пресування. Досліджено вплив зміни формуючих елементів на характер ущільнення шихт в міжвалковому просторі. Виведено аналітичні вирази для визначення складових тиску пресування. Дані дослідження є основою створення розрахунково-аналітичного апарату для прогнозування зносу бандажів і оцінки його впливу на технологічні та енергосилові параметри процесу брикетування. Створення такого апарату дозволить на стадії проектування пресового обладнання виконати оцінку допустимого ступеня зносу робочої поверхні бандажів і розробити технічні рішення і рекомендації щодо продовження ресурсу їх експлуатації.

2.1.2. Аналіз механізму зношування бандажів

Для вирішення поставлених в роботі завдань по збільшенню тривалості і надійності експлуатації бандажів важливо правильно представляти фізичні процеси, що відбуваються при їх зношуванні. Знос бандажів валків брикетних пресів проявляється в зміні розмірів і конфігурації формуючих елементів. Інтенсивність зносу бандажів залежить від зовнішніх і внутрішніх факторів. До перших відносяться величина і характер навантажень, режим взаємного переміщення частинок шихти і пресуючої поверхні , наявність інтенсифікаторів зносу (агресивні матеріали в складі шихти), температурні умови при брикетуванні; до других – твердість, межа пружності, характеристики структури матеріалу бандажів.

Тілами, що здійснюють руйнування при абразивному зносі бандажів валкових пресів є частинки різного ступеню твердості, для яких характерні малі адгезія та схоплювання. Різноманітність розмірів, геометричних форм і фізико-механічних

властивостей частинок шихт, умов їх пресування обумовлює різний напружений стан в точках контактів матеріалу з поверхнею валків. Руйнування поверхневих шарів матеріалу бандажів відбувається як при одноразовому, так і, переважно, при багаторазовій дії частинок шихти, тобто має місце або мікрорізання вузького та крихкого матеріалу, або втома – малоциклова в пластичної області та багатоциклових в пружній області [128]. У різних зонах осередку деформації шихти в валковому пресі при різних режимах брикетування і фізико-механічних властивостях шихти абразивне зношування бандажів може проявлятися у вигляді: мікрорізання – при глибокому впровадженні частинок; малоциклової втоми при повторній пластичній деформації мікронерівностей (із середньою глибиною занурення); втоми при багаторазовому пружному деформуванні (з малою глибинною занурення). Складність вивчення процесів та умов зношування бандажів обумовлюють найрізноманітніші поєднання елементарних процесів руйнування та знеміцнення мікрооб'ємів поверхневих шарів металу. Знос бандажів визначається, перш за все, фізико-механічними властивостями матеріалу бандажа, шихти та величиною контактних напружень.

Показники, що характеризують процес зносу бандажів, залежать від конкретних умов взаємодії їх робочих поверхонь та шихти, форми осередку деформації, режиму брикетування. Визначення властивостей шихти важливо при вивченні механізму зносу, його інтенсивності, параметрів зносостійкості матеріалу бандажів і т.п. Вплив навантажень на знос бандажів визначається значеннями тиску пресування, що розвивається при формуванні брикетів в осередку деформації валкового преса. Відомо, що тиск пресування уздовж контуру формуючих елементів та в осередку деформації розподілений нерівномірно, що впливає характер зносу бандажів.

Значення тиску пресування в осередку деформації валкового преса визначаються величиною опору шихти стиску. У ІЧМ створена методика [84,129,130,131], а також є лабораторне обладнання [132], які дозволяють комплексно дослідити фізико-механічні характеристики дрібнофракційних

матеріалів і шихт. При цьому характеристики опору шихт стиску представляються графічно у вигляді кривих пресування і аналітичних виразів.
Для розробки методів вирішення завдань, поставлених у роботі, необхідно встановлення взаємозв'язків між тиском пресування, напруженнями на контактних поверхнях, зносом бандажів та параметрами брикетування. Величина і розподіл тиску пресування в осередку деформації валкового преса визначаються за допомогою розрахункового апарату, описаного раніше в виконаних співробітниками ІЧМ роботах [77, 87, 133].

Навантаженість бандажів характеризується величиною і розподілом контактних напружень на їх робочих поверхнях. Як відомо, найбільш навантажені ділянки деталей машин зношуються в більшій мірі, ніж інші. Таким чином, знання про величину і розподіл контактних напружень на робочих поверхнях бандажів можна використовувати в якості інструменту для прогнозування картини їх зносу. Побудова прогнозної картини зносу бандажів дозволить при проектуванні преса оцінити вплив зміни формуючих елементів і ступеня їх зносу на енергосилові і технологічні параметри процесу брикетування та, тим самим, забезпечити отримання інформації, необхідної для розробки раціональних режимів експлуатації бандажів.

Для розробки методів прогнозування впливу зносу бандажів на процес брикетування в валковому пресі обрані показники оцінки зносу.

Першим і найбільш легко визначним показником є зміна геометричних розмірів формуючих елементів, визначити які можна шляхом вимірювання профілю формуючих елементів експлуатованих бандажів і порівняння його з проектними розмірами.

Про ступінь зносу можна судити і по зміні якості брикетів - їх щільності, міцності, а також за величиною облоя і кількості просипи при брикетуванні. Ці показники характеризують ступінь зношеності і придатності бандажів до подальшої експлуатації.

Третім показником є зміна енергосилових параметрів брикетування, яку можна зафіксувати за допомогою контрольно-вимірювальної апаратури. Зусилля

пресування можна визначити за допомогою спеціально розроблених силовимірювальних систем. Зміну моменту пресування в промислових умовах найбільш просто побічно визначити по струму електродвигуна приводу преса.

Найбільш повною є оцінка впливу зносу за сукупністю зазначених вище показників. Для виконання такої оцінки необхідно створення спеціального аналітичного апарату. Передумови для його створення вказані вище. Сам же апарат повинен дозволити:

- прогнозувати зміну геометричних співвідношень формуючих елементів в результаті зносу бандажів;
- прогнозувати вплив величини зносу бандажів на зміну якості брикетів, в першу чергу на зміну величини коефіцієнта ущільнення шихти і щільності брикетів;
- оцінити вплив величини зносу бандажів на зміну енергосилових параметрів брикетування.

2.1.3. Розробка концепції і системи досліджень впливу зносу бандажів на параметри процесу брикетування

Важливою тенденцією вдосконалення пресів для брикетування дрібнофракційних шихт є пошук технічних рішень, які б в поєднанні з технологічними прийомами дозволили розширити номенклатуру пресованих матеріалів, при цьому забезпечуючи високу надійність і тривалий термін експлуатації пресового обладнання.

Одним з аспектів вирішення цього завдання є вивчення можливості експлуатації бандажів валків при різному ступеню їх зносу, вибір відповідних допустимих режимів роботи преса і технологічних параметрів, визначення граничної величини зносу, при якій ще можлива експлуатація бандажів.

Прийнята концепція, яка полягає у встановленні взаємозв’язків між навантаженнями, що діють на робочі поверхні бандажів, характером і величиною їх зносу, енергосиловими і технологічними параметрами брикетування [134].

Дослідження впливу зносу бандажів на процес брикетування ускладнюються різноманіттям зв’язків між величиною зносу, конфігурацією формуючих елементів, фізико-механічними властивостями шихти і ін. Для їх опису та вивчення необхідний системний підхід. Для його реалізації розроблено структуру системи досліджень, що об’єднує експериментальні та аналітичні методи, математичні моделі і комп'ютерні програми.

Структурна схема даної системи приведена на рис. 2.2. Виконання досліджень відповідно до схеми ділиться на три етапи.

Перший етап включає аналіз факторів, що визначають характер і ступінь зносу бандажів – фізико-механічні властивості брикетуємих матеріалів, конструктивні параметри і матеріал бандажів.

Відображенням комплексу фізико-механічних властивостей брикетуємих шихт є функціональний взаємозв'язок між величиною ущільнення шихти і тиском пресування p, який може бути представлений графічно у вигляді кривих пресування або аналітичними виразами [84,86].

Для обраних матеріалів і шихт визначаються фізико-механічні властивості (насипна щільність, гранулометричний склад, вологість і ін.) та опір стисненню. За допомогою цих залежностей для кожної з шихт встановлюється тиск пресування, необхідний для досягнення заданої величини ущільнення шихти. Величина тиску пресування, в свою чергу, визначає значення контактних напружень на робочих поверхнях бандажів. Знання їх величини і розподілу необхідно для розробки методу побудови прогнозної картини зносу.

На розподіл напружень в бандажах та їх знос, крім фізико-механічних властивостей шихт, істотно впливає конфігурація формуючих елементів і матеріал бандажів. Вибір відповідно з структурною схемою досліджень (рис. 2.2) основних геометричних параметрів бандажів (діаметр і ширина робочих поверхонь) і конфігурації формуючих елементів визначають умови формування осередку деформації, а також напружено-деформований стан шихти. Вибір матеріалу бандажів в значній мірі визначає умови їх фрикційної взаємодії з шихтою.

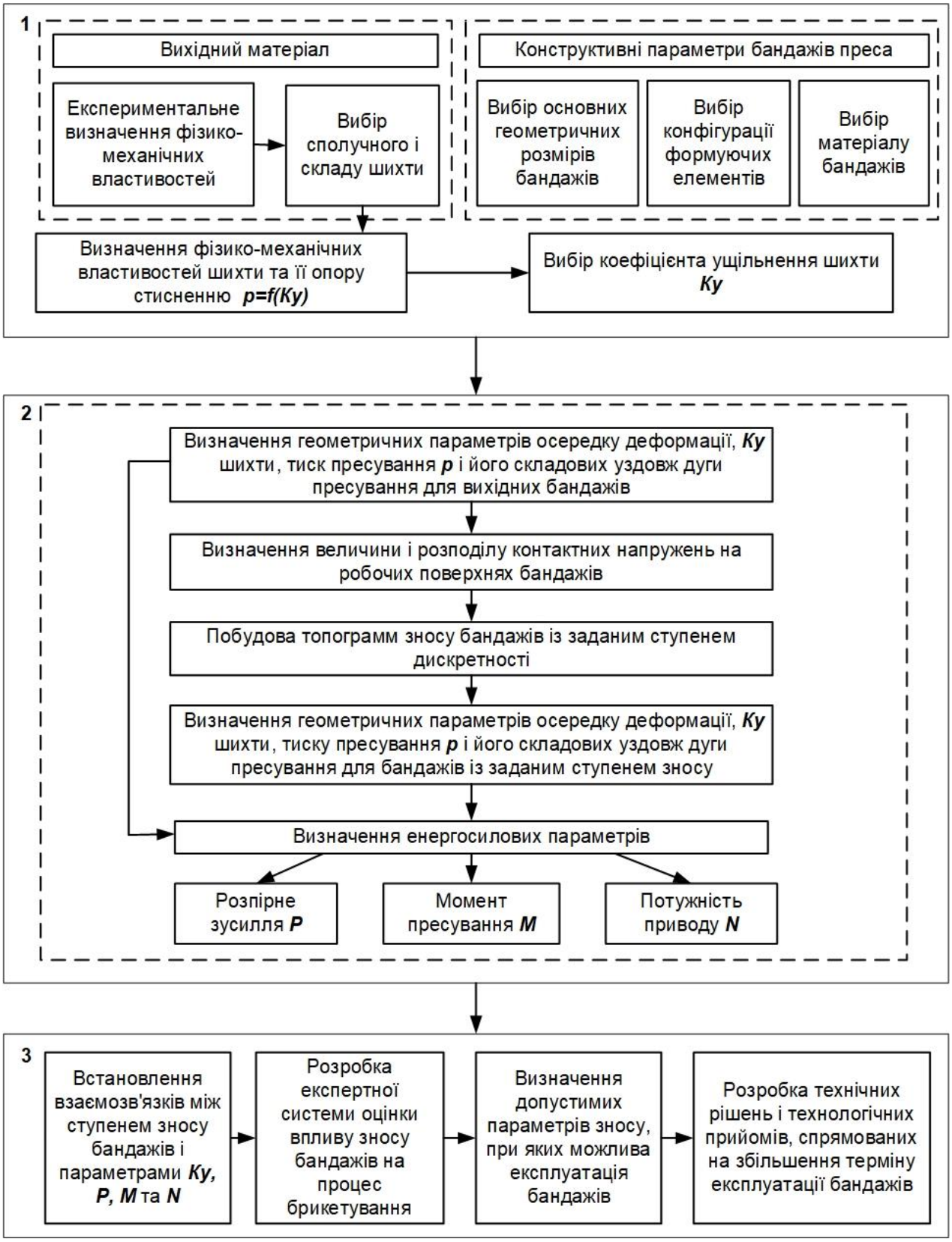


Рисунок 2.2 – Структурна схема системи досліджень впливу зносу бандажів на енергосилові і технологічні параметри процесу брикетування

Другий етап досліджень передбачає створення розрахунково-аналітичних методів і математичних моделей, що дозволяють отримати масив розрахункових даних, які характеризують знос бандажів з урахуванням їх конструктивних параметрів і властивостей шихти, а також визначити зміну параметрів брикетування при різному ступеню зносу бандажів.

При брикетуванні шихта бере участь в силовій контактній взаємодії з валками преса, утворюючи з кожним з бандажів пару тертя. Тому, для оцінки руйнуючої дії шихти на робочі поверхні бандажів необхідно визначити величину і розподіл контактних напружень.

На даному етапі досліджень виконується аналіз сил, що діють в осередку деформації валкового преса з урахуванням властивостей шихти і конфігурації формуючих елементів, на основі якого розробляється математична модель для визначення величини і розподілу контактних напружень, що виникають на робочих поверхнях бандажів. Отримані розрахункові дані представляються графічно у вигляді епюр контактних напружень.

Для вирішення завдань, передбачених структурною схемою досліджень, запропоновано новий метод аналітичного дослідження, що включає розробку математичної моделі визначення величини зносу, побудову топограм зносу бандажів і їх застосування для оцінки впливу ступеня зносу на технологічні і енергосилові параметри брикетування. Топограми представляють собою графічне відображення профілів бандажів, побудованих для різних стадій зносу із заданою дискретністю.

За допомогою топограм і спеціально розробленого розрахунково-аналітичного апарату формуються масиви розрахункових даних про значення коефіцієнта ущільнення шихти і енергосилові параметри брикетування – зусилля P і моменту M пресування, та потужності приводу преса N, відповідних різному ступеню зносу бандажів.

На підставі отриманих масивів даних на третьому етапі досліджень встановлюються взаємозв'язки між величиною зносу бандажів і параметрами брикетування ($Ку$, P, M и N), які можуть бути представлені у вигляді графіків або аналітичних виразів. За допомогою цих залежностей визначаються значення

параметрів зносу бандажів, при яких можлива їх експлуатація за умови дотримання технологічних вимог, що пред'являються до брикетів, і технічних характеристик роботи пресового обладнання. На підставі отриманих результатів розробляється експертна система, що представляє собою сукупність прогнозного, оцінного, експериментального та інших підходів, що реалізуються за допомогою експериментальних і розрахункових методів, математичних моделей і комп'ютерних програм. Практичне використання системи дозволить накопичити базу даних про допустимі межі експлуатації бандажів і на їх підставі для конкретного виконання бандажа і прийнятої технології розробити карти експлуатації бандажів, що містять технологічні та енергосилові показники роботи преса при різних стадіях зносу бандажів, а також набір технологічних прийомів і технічних рішень, які дозволяють максимально розширити діапазон їх експлуатації. До технологічних прийомів відносяться: регулювання подачі матеріалу в валки, управління фізико-механічними властивостями шихти шляхом коригування її складу. Ці прийоми забезпечать отримання брикетів з допустимою величиною ущільнення шихти до певної міри зносу. До технічних рішень відноситься коригування параметрів формуючих елементів, їх розташування на робочих поверхнях бандажів, розробка способів відновлення найбільш зношуваних ділянок бандажів при певній заданій величині їх зносу.

2.2. Формування вхідних даних необхідних для дослідження впливу зносу бандажів на параметри процесу брикетування

2.2.1. Вибір характерних матеріалів, вивчення їх фізико-механічних властивостей і визначення опору стисненню

На параметри брикетування, навантаженість і знос бандажів валкових пресів впливають фракційний склад і насипна щільність шихти, форма і твердість частинок, показники, що характеризують зовнішнє і внутрішнє тертя в

шихті, опір шихти стисканню. Чим вище необхідний коефіцієнт її ущільнення, тим більше навантаження на бандажі та вище їх знос.

Відповідно до поставлених завдань роботи необхідно вивчити не механізм і природу зносу бандажів, а вплив його ступеня на енергосилові і технологічні параметри процесу брикетування.

Функціональний взаємозв'язок між величиною ущільнення шихти і тиском пресування p, представлений графічно у вигляді діаграм пресування або аналітичних виразів, відображає весь комплекс фізико-механічних властивостей брікетіруемих шихт, характеризує їх ступінь опору стисненню і служить вихідними даними для розрахунку силових параметрів пресового обладнання. Як вже згадувалося, в ІЧМ створена методика, а також є лабораторна установка, яка дозволяє автоматично реєструвати усадку дрібнофракційних матеріалів при навантаженні.

Виконані в ІЧМ дослідження показали, що процеси ущільнення металургійних шихт з задовільною точністю описуються рівняннями типу:

$$p = a \cdot Ky^{b} \qquad (2.2)$$

де a и b – коефіцієнти, що характеризують властивості і тип шихти; Ky – коефіцієнт ущільнення, який дорівнює відношенню густини брикету ρ_{br} до насипної щільності шихти ρ_{nas}.

Перспективним шляхом прогнозування зносу бандажів представляється встановлення зв'язку ступеня зносу з опором шихти стиску як комплексною характеристикою, що відображає фізико-механічні властивості матеріалу. При цьому необхідно вибрати для дослідження матеріали, що істотно відрізняються за фізико-механічними властивостями, а, отже, за інтенсивністю впливу на знос бандажів. Для виконання досліджень обрані матеріали, часто використовувані в промислових процесах брикетування, в тому числі, і в технологічних лініях, створених за участю ІЧМ. Це дозволить порівняти результати теоретичних розрахунків з практично заміряним зносом бандажів в ході експлуатації пресів.

1. **Відсіви силікомарганцю** представляють собою матеріали поліфракційний складу з високим значенням насипної щільності (від 1,5 г/см^3 до 3 г/см^3) і твердості частинок (близько 38...45 HRC). На металургійних підприємствах при класифікації за фракціями феросплавів утворюється значна кількість дрібних фракцій класу 0...-10 мм. В даний час відсівання силікомарганцю піддаються переробці шляхом окускования методом брикетування (ВАТ «Нікопольський завод феросплавів», ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», «Завод з виробництва брикетів для металургійної промисловості ООО «Конкрет » та ін.).
2. **Коксовий дріб'язок** – поліфракційний матеріал, має низьку насипну щільність (0,5...0,7 г/см^3). Він у великих кількостях утворюється на коксохімічних і металургійних заводах. Добре брикетується з сполучними. Його переробка на території України методом брикетування ведеться низкою підприємств. Для досліджень взятий коксовий дріб'язок фракції -3 мм з вологістю ≈5%.
3. **Каолін** – матеріал, широко використовуваний при виробництві вогнетривів для металургійної промисловості. Насипна щільність – 1...1,3 г/см^3. Каолін може істотно змінювати свої фізико-механічні властивості тільки за рахунок зміни вологості, має неоднорідний фракційний склад за рахунок конгломерірованія дрібних частинок. На ВАТ «Великоанадольський комбінат вогнетривів» брикетуванню піддається каолінова сировина марок КВ-1, КВ-2, КВ-3. За хімічним складом і фізико-механічними властивостями ці матеріали близькі між собою. Вологість матеріалів 10...20%, насипна щільність – 0,96...1,08 г/см^3. Гранулометричний склад матеріалу, що подається на брикетування, визначається умовами його дроблення. Для проведення досліджень прийнятий каолін марки КВ-1. В діапазоні вологості 10...20% і відповідної їй насипної щільності 1,026...1,067 г/см^3 КВ-1 дозволяє отримувати якісні брикети без сполучного.

Гранулометричний склад і розмір часток прийнятих матеріалів він приведений в таблиці 2.1.

З таблиці видно істотна відмінність матеріалів за вказаними параметрами. Матеріали також сильно відрізняються за твердістю частинок. Найбільшу твердістю мають частки відсіву феросплавів.

Таблиця 2.1 – Фракційний склад матеріалів для приготування шихти

Матеріал	Фракція, мм	Вміст фракцій, % мас.	Середній діаметр частинок, мм
Відсів силікомарганцю (фр-6 мм)	-6…+5	7,87	2,22
	-5…+3	16,77	
	-3…+2	17,78	
	-2…+1	27,51	
	-1…0	30,07	
Відсів силікомарганцю (фр-3 мм)	-3…+2	15,76	1,07
	-2…+1	32,24	
	-1…+0,5	14,2	
	-0,5…+0,25	14,90	
	-0,25…+0,14	9,40	
	-0,14…0	13,50	
Каолін марки КВ-1	-5…+2	40,81	0,35
	-2…0	59,19	
Коксовий дріб’язок	+5	5,85	0,85
	-5…+3	14,25	
	-3…+2	10,05	
	-2…+1	30,60	
	-1…+0,5	5,10	
	-0,5…0	34,15	

На поведінку дрібнофракційних матеріалів при їх брикетуванні істотно впливає тип і кількість сполучної речовини. Її присутність додає матеріалу пластичність і зв'язність, змінює опір стисненню.

Для проведення досліджень прийнятий наступний склад шихт: 1. 96,5% силікомарганцю (фр. -6 мм) и 3,5% органічного сполучного; 2. 98,5% силікомарганцю (фр.-3 мм) и 1,5% органічного сполучного; 3. 85% коксового дріб’язку, 7,5% вапна гашеного и 7,5% меляси; 4. 97% коксового дріб’язку и 3% органічного сполучного; 5. каолін з вологістю 10%; 6. каолін з вологістю 15%.

Для кожної з шихт вид і кількість сполучного обрані виходячи з практичного досвіду переробки прийнятих матеріалів в промислових умовах. Насипна щільність використаних шихт дорівнює, відповідно, 2,1; 2,17; 0,54; 0,54; 0,99; 1,00 г/см^3.

Як зазначалося раніше, весь комплекс фізико-механічних властивостей шихт відображає функціональний взаємозв'язок між тиском пресування *p* і величиною ущільнення, виражений через коефіцієнт ущільнення *Ку*. Для досліджуваних шихт експериментально встановлено взаємозв'язок, який в графічному вигляді представлений на рис. 2.3. Різниця кривих, представлених на рисунку, наочно демонструє відмінність між собою шихт за величиною опору стисненню – однаковому значенню тиску пресування відповідає різна ступінь ущільнення.

Отже, кожна з цих шихт буде характеризуватися різним ступенем впливу на зношування робочої поверхні бандажів.

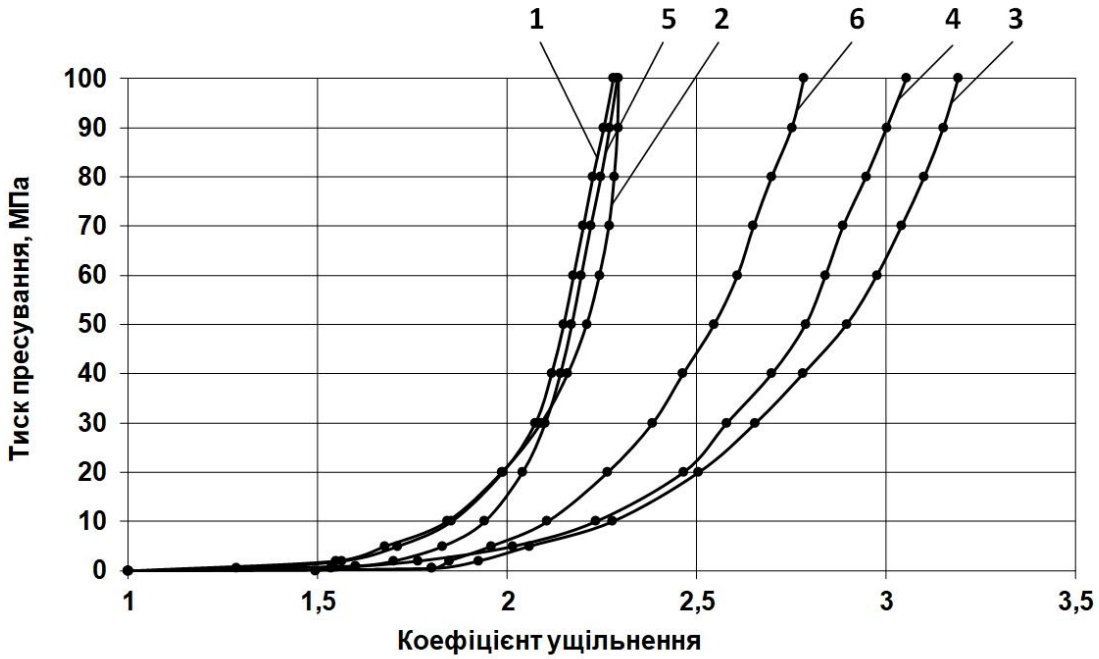


Рисунок 2.3 – Залежність коефіцієнта ущільнення від тиску пресування для шихт: 1. 96,5% силікомарганцю (фр. -6 мм) и 3,5% органічного сполучного; 2. 98,5% феромарганцю (фр. -3 мм) и 1,5% органічного сполучного; 3. 85% коксового дріб'язку, 7,5% вапна гашеного и 7,5% меляси; 4. 97% коксового дріб'язку и 3% органічного сполучного; 5. каолін з вологістю 10%; 6. каолін з вологістю 15%.

Для практичної зручності використання в розрахунках функціональний взаємозв'язок між параметрами ущільнення повинен бути представлений у вигляді аналітичного виразу типу (2.2). Числові значення коефіцієнтів a і b, що входять в рівняння (2.2), для прийнятих шихт визначені шляхом апроксимації експериментальних даних і наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти рівнянь, що описують взаємозв'язок між величиною ущільнення і тиском пресування шихт

№ п/п	Шихта	Коефіцієнти рівняння типу $p = a \cdot Ky^b$, $0 < p < 100$ МПа	
		a	b
1.	96,5% силікомарганцю (фр. -6 мм) и 3,5% органічного сполучного	0,00562	11,9
2.	98,5% феромарганцю (фр. -3 мм) и 1,5% органічного сполучного	0,00213	12,8
3.	85% коксового дріб'язку, 7,5% вапна гашеного и 7,5% меляси	0,0382	6,77
4.	97% коксового дріб'язку и 3% органічного сполучного	0,0276	7,36
5.	каолін з вологістю 10%	0,00145	13,5
6.	каолін з вологістю 15%	0,0320	7,87

Для проведення розрахунково-аналітичних досліджень ступеня і характеру впливу зносу бандажів валкових пресів на енергосилові і технологічні параметри брикетування, крім наведених вище даних про фізико-механічні властивості прийнятих для досліджень шихт, необхідно вказати основні вихідні дані про режими отримання брикетів.

Режими брикетування шихт визначають тиск пресування, що виникає в осередку деформації валкового преса. Цей тиск, в свою чергу, визначає навантаження на робочих поверхнях бандажів, які характеризується розподілом контактних напружень. Як зазначалося раніше, дані про розподіл контактних напружень на

робочих поверхнях бандажів є основою для розробки методу побудови прогнозної картини зносу.

Співвідношення між коефіцієнтом ущільнення *Ку* і тиском пресування *р*, які забезпечують отримання брикетів з заданими споживчими властивостями, визначають вибір режиму брикетування.

З досвіду отримання брикетів з шихт, близьких за складом до аналізованих в роботі, на промислових валкових пресах і експериментальному валковому пресі ІЧМ відомий діапазон щільності, який відповідає брикетам задовільної якості. Для встановлення цього діапазону на рис. 2.4 криві ущільнення представлені як взаємозв'язок між щільністю і тиском пресування.

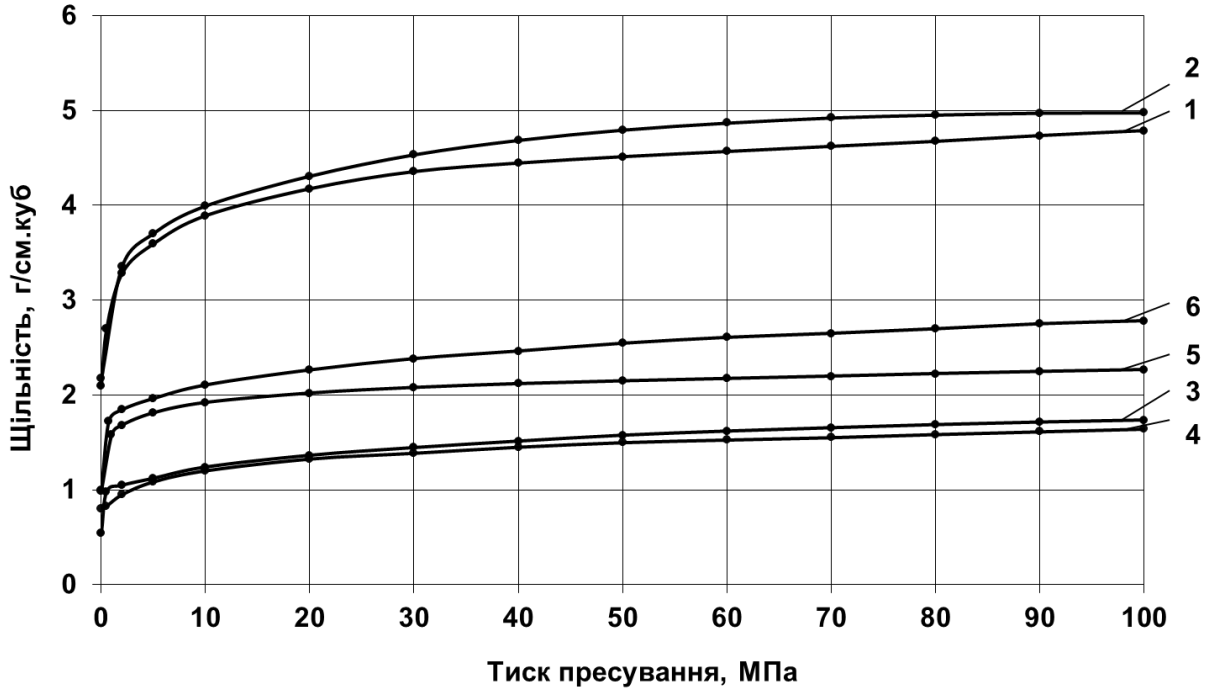


Рисунок 2.4 – Залежність щільності від тиску пресування для шихт: 1. 96,5% силікомарганцю (фр. -6 мм) и 3,5% органічного сполучного; 2. 98,5% феромарганцю (фр. -3 мм) и 1,5% органічного сполучного; 3. 85% коксового дріб’язку, 7,5% вапна гашеного и 7,5% меляси; 4. 97% коксового дріб’язку и 3% органічного сполучного; 5. каолін з вологістю 10%; 6. каолін з вологістю 15%.

Величина щільності для кондиційних брикетів з шихт на основі відсіву силікомарганцю знаходиться в межах 3,8...4,9 г/см^3.

Для шихти, що складається з 96,5% силікомарганцю (фр. -6 мм) і 3,5% органічного сполучного, значення коефіцієнта ущільнення шихти, необхідні для досягнення зазначеної щільності, згідно кривим пресування складають 1,8...2,3. Основне ущільнення при цьому здійснюється при тисках 10...102 МПа.

Для шихти 98,5% силікомарганцю (фр.-3 мм) і 1,5% органічного сполучного значення коефіцієнта ущільнення, необхідні для досягнення зазначеної щільності брикетів, складають 1,8...2,3, що відповідає тиску пресування 10...65 МПа.

Величина щільності для кондиційних брикетів з шихт на основі відсіву силікомарганцю знаходиться в межах 3,8...4,9 г/см^3.

Діапазон щільності кондиційних брикетів з шихт на основі коксового дріб'язку лежить в межах 1,3...1,5 г/см^3. Розглянуті в роботі шихти на основі коксового дріб'язку мають однакову насипну щільність, рівну 0,54 г/см^3. Для досягнення заданої щільності брикетів необхідно забезпечити коефіцієнт ущільнення 2,42...2,79. Відмінність при цьому буде складатися в значеннях тиску пресування, при якому досягається необхідна щільність брикетів, так як дані шихти мають різний опір стисненню. Згідно кривим пресування (рис. 2.3), зазначена щільність брикетів досягається для шихти з 85% коксового дріб'язку, 7,5% вапна гашеного і 7,5% меляси при тисках 15...40 МПа, а для шихти з 97% коксового дріб'язку і 3 % органічного сполучного при – 18...52, 5 МПа.

Для отримання кондиційних брикетів з каолінової сировини марки КВ-1 необхідно забезпечити щільність 2,0...2,1. Для цього матеріалу вологість шихти має суттєвий вплив на опір стисненню. Для каоліну з вологістю 10% коефіцієнт ущільнення, рівний 2,0...2,1 та необхідний для досягнення заданої щільності, досягається при тиску пресування 15...30 МПа, а при вологості 15% ця ж величина ущільнення досягається при тиску порядку 10 МПа (рис. 2.3, 2.4).

З наведених даних випливає, що для досліджуваних шихт режими брикетування будуть відрізнятися між собою як за величиною ущільнення шихт, так і за тисками пресування. Отже, ступінь зносу бандажів буде відрізнятися.

Таким чином, досліджувані шихти відрізняються між собою твердістю частинок, гранулометричним складом, насипною щільністю і здатністю стиску, що знаходить відображення в характері взаємозв'язків між тиском пресування p, коефіцієнтом ущільнення Ky та щільністю брикетів ρ_{br} (рис. 2.3, 2.4 та табл. 2.2). Аналітичні залежності, що характеризують опір шихти стиску (табл. 2.2), в подальшому будуть використані при розрахунку величини і розподілу тиску пресування і його складових в осередку деформації валкового преса і контактних напружень на робочих поверхнях бандажів.

У процесах пресування дрібнофракційних шихт, крім фізико-механічних властивостей, на напружено-деформований стан шихти і режими брикетування впливає конфігурація пресуючого інструменту [1,67,74,76,77,81,87].

2.2.2 Вибір конструктивних параметрів бандажів і формуючих елементів

В роботі прийнятий підхід до розробки методів для дослідження впливу зносу бандажів на процес брикетування, в якому використовуються знання про розподіл контактних напружень на робочих поверхнях бандажів.

Конфігурація формуючих елементів впливає на розподіл контактних напружень на робочих поверхнях бандажів. Вони визначають формування осередку деформації, напружено-деформований стан шихти і режими брикетування. Відомі роботи [1,82,77-79,131,135-143], в яких досліджені різні аспекти процесу брикетування, обумовлені конфігурацією формуючих елементів.

На основі раніше виконаних досліджень розроблено науковий підхід до вибору конфігурації формуючих елементів валкових пресів, що забезпечують необхідні параметри процесу брикетування. Розроблений раніше розрахунково-аналітичний апарат є основою для вирішення нових наукових завдань,

спрямованих на розкриття взаємозв'язків між величиною зносу бандажів валкового преса, конфігурацією формуючих елементів і фізико-механічними властивостями шихти. Вирішення цих завдань дозволить створити науково-обґрунтований підхід до вибору раціональних режимів експлуатації бандажів валкових пресів і розробити технічні рішення, спрямовані на збільшення тривалості їх експлуатації.

Відомо два основних, найбільш поширених, типи формуючих елементів бандажів валкових пресів (рис. 2.5).

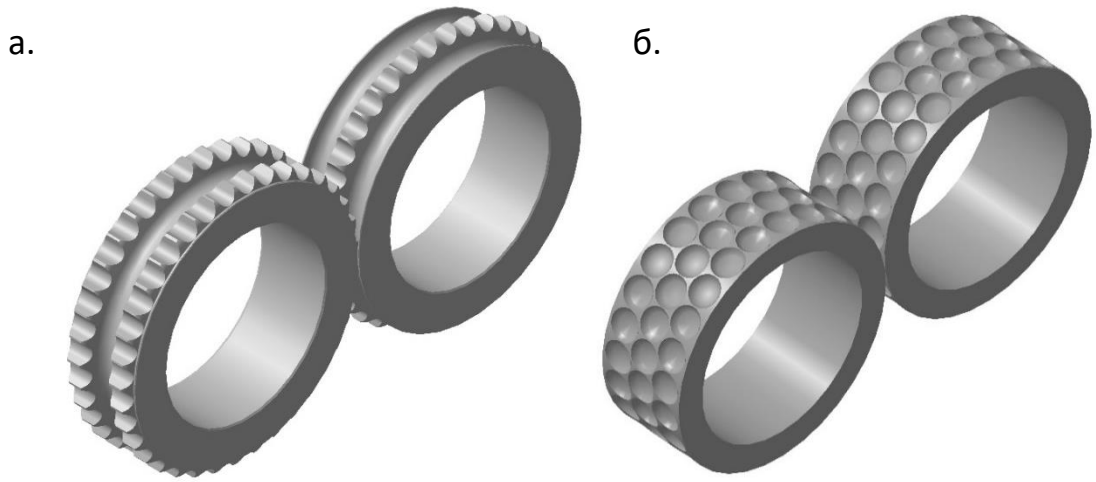


Рисунок 2.5 – Типи формуючих елементів бандажів валкових пресів
а – з формуючими елементами зубчасто-жолобчастої конфігурації;
б – з формуючими елементами у вигляді напівформ

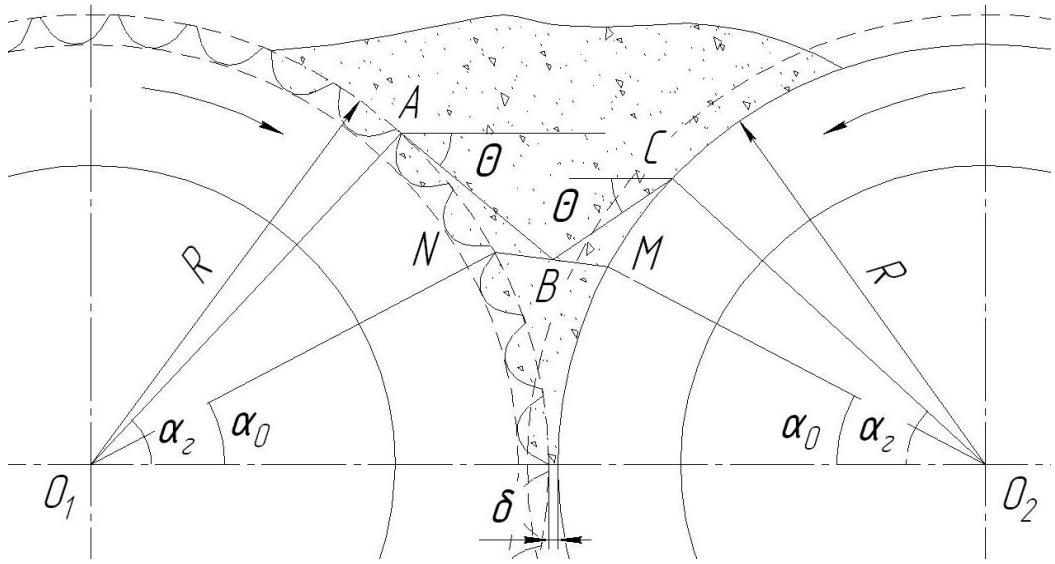
На рис. 2.6 показані схеми формування осередку деформації для зазначених типів формуючих 6елементів бандажів валкових пресів.

Величина кута захоплення шихти валками (рис. 2.6а) для зубчастого і жолобчастого рядів валка різна. Це обумовлено тим, що для зубчастого ряду умови захоплення шихти визначаються умовами внутрішнього тертя в шихті, а для жолобчастого ряду – зовнішніми [1,79]. Для всього осередку деформації, через різницю радіусів відповідних пресуючих поверхонь правого і лівого валка характерні особливості, які властиві несиметричній прокатці в гладких валках

[71,72]. Це призводить до нахилу щодо горизонталі лінії NM, яка визначає початок зони пресування.

Для схеми, представленої на рис. 2.6б, характерно формування осередку деформації симетричного щодо вертикального напрямку, тому що радіуси відповідних пресуючих поверхонь валків в цьому випадку рівні.

а.



б.

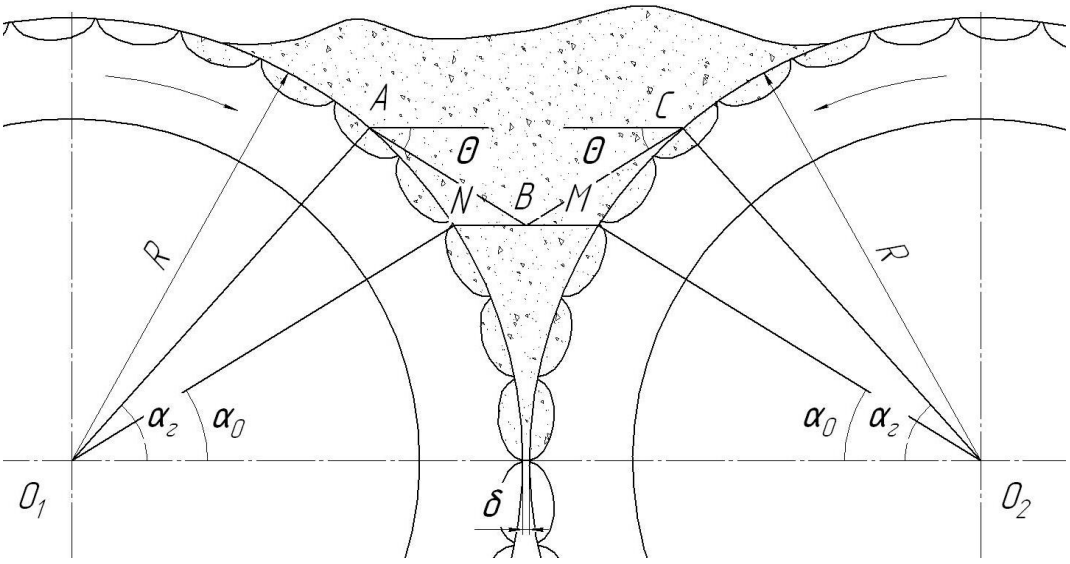
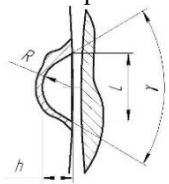
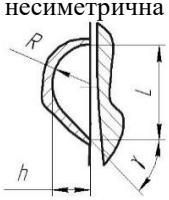
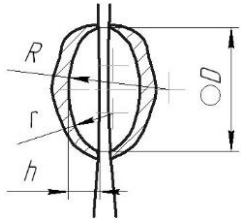


Рисунок 2.6 – Схема формування осередку деформації в валковому пресі

а – з формуючими елементами зубчасто-жолобчастої конфігурації;

б – з формуючими елементами у вигляді напівформ

Таблиця 2.3 – Геометричні параметри формуючих елементів і валків преса

Конфігурація формуючого елемента	Умовне позначення конфігурації	Діаметр валків, мм	Ширина валків, мм	Геометричні параметри, що визначають конфігурацію формуючого елемента					Зазор між валками δ, мм	Об'єм формуючого елемента з урахуванням зазору між валками , см^3	Кількість рядів формуючих елементів по ширині валка	Кількість формуючих елементів в одному ряді
				D(L), мм	h, мм	R, мм	r, мм	γ, град				
Зубчасто-жолобчаста симетрична 	F1	648	350	59,70	24,7	24,7	-	66	0,5	50,00	5	32
	F2	648	350	39,12	17,0	17,0	-	66		14,63	9	50
Зубчасто-жолобчаста несиметрична 	F3	498,5	100	33,00	14,5	12	-	45		11,00	3	48
Лінзоподібна 	F4	648	350	40,86	10,5	35,0	3,1	-		18,25	8	49

Різниця в умовах формування осередку деформації впливає на напружено-деформований стан шихти і навантаження, що діють на робочі поверхні бандажів.

Важливими параметрами, що впливають на напружено-деформований стан шихти і навантаження, що діють на валки, є конфігурація і розмір формуючих елементів. Залежно від них змінюються величина кута і відповідно зони пресування, що забезпечують необхідне ущільнення шихти. Змінюються співвідношення між складовими тиску пресування, що впливає на навантаженість бандажів і формування полів розподілу напружень. Для проведення аналізу прийняті варіанти конструктивного виконання бандажів (табл. 2.3), які застосовуються при виготовленні валкових пресів, що розробляються в ІЧМ.

У табл. 2.3, також наведені розрахункові дані, що характеризують умови розміщення формуючих елементів на робочих поверхнях бандажів.

Таким чином, в подальших дослідженнях будуть представлені різні конфігурації і типорозміри формуючих елементів.

2.2.3. Аналіз контактних напружень на робочих поверхнях бандажів валкового преса

Як зазначалося вище, прийнята в роботі концепція полягає у встановленні взаємозв'язків між тиском пресування, контактними напруженнями, що виникають при взаємодії шихти з бандажами, зносом бандажів, енергосиловими і технологічними параметрами брикетування від ступеня зносу. Для реалізації даної концепції необхідно створення математичних моделей, що описують ці взаємозв’язки.

Найбільш близькими до наших умов з фізичної сутності є відомі моделі зносу прокатних валків [144, 145], які базуються на встановлених взаємозв'язках між інтенсивністю зносу, контактними напруженнями і властивостями матеріалу поверхні, що зношується [115, 117].

Для застосування зазначених математичних моделей слід врахувати особливості механізму взаємодії пресуючих поверхонь бандажів і сипучого матеріалу, що ущільнюється. В процесі брикетування шихта бере участь в силовій контактній взаємодії з валками, які обертаються один назустріч другому і робить при цьому відносне переміщення, утворюючи разом з кожним з бандажів пару тертя. На початковій стадії ущільнення шихти, внаслідок неоднорідності її гранулометричного складу і шорсткості робочих поверхонь бандажів, силова взаємодія характеризується локальністю, тобто відбувається на плямах фактичного контакту. Малі розміри плям фактичного контакту і незначність їх сумарної площі в порівнянні з площею робочої поверхні бандажа в зоні пресування є причиною великих фактичних тисків на контакті, що призводить до руйнування зерен шихти з одночасним деформуванням поверхневих шарів металу бандажів. З ростом величини ущільнення в шихті починають переважати пластичні деформації і вона наближається за своїми властивостями до суцільного тіла. Коректність застосування гіпотези суцільності при вивченні процесів ущільнення дрібнофракційних матеріалів обгрунтована і підтверджена авторами робіт [146-149]. Виходячи з цієї гіпотези, нами прийнято допущення, що площа плям контактів шихти з бандажем в зоні пресування дорівнює площі ділянок робочих поверхонь бандажів, що знаходяться в силовій взаємодії з шихтою. Це дозволяє при розробці математичної моделі зносу бандажів для визначення значень контактних напружень, що виникають на їх робочих поверхнях, використовувати розрахунково-аналітичний апарат, представлений в роботі [87], в якій проведено аналіз сил, що діють в осередку деформації. В роботі [87] виконано оцінку впливу силових параметрів на міцність бандажів. В якості критерію оцінки приймалася умова відсутності руйнування тіла бандажа. У даній роботі аналіз цих сил необхідно виконати з умови їх руйнівного впливу на робочі поверхні бандажів за рахунок деформаційних і фрикційних процесів.

Робочі поверхні бандажів валкових пресів представляють собою складні об’ємні поверхні. Це визначає нерівномірність розподілу тиску пресування і

контактних напружень в осередку деформації, що призводить до нерівномірності зносу робочих поверхонь бандажів [150]. Визначення значень контактних напружень на робочій поверхні бандажів в тривимірній постановці є досить складним. Тому в роботі для спрощення рішення даного завдання розглянуті два характерних перетину бандажа, які найбільш повно відображають його геометричні параметри – поперечні і поздовжні.

На рис. 2.7, 2.8 представлені розрахункові схеми для двох типів калібрування бандажів валкових пресів (зубчасто-жолобчастою і лінзоподібної). Використання запропонованих схем дозволяє визначити розподіл і величину контактних напружень, що виникають на робочих поверхнях бандажів. Розглянемо вплив сил, представлених на розрахункових схемах, на взаємодію робочих поверхонь бандажів з ущільнюваною шихтою. За рахунок обертання валків силова взаємодія бандажів характеризується періодичністю впливу тиску пресування p_1, p_2 на відповідні ділянки робочих поверхонь бандажів. Таким чином, в зоні пресування відбуваються циклічні процеси вдавлення і прослизання частинок шихти відносно робочих поверхонь бандажів, тобто спостерігається постійно повторюваний пластичний зсув частинок поверхневого шару металу бандажів, супроводжуваний його розущільненням, диспергуванням і, відповідно, втратою в процесі руху і масообміну. При цьому величина вдавлення визначається як співвідношенням твердості матеріалу бандажа і частинки матеріалу, що брикетується, так і величиною нормальних напружень p_{1n}, p_{2n} на майданчику їх контакту. Прослизання частинок шихти щодо поверхні бандажа визначається величиною дотичних напружень p_{1t}, p_{2t} та напружень від сил тертя p_{1mp} та p_{2mp}. За аналогією з моделями оцінки зносу, прийнятими в прокатці [151], величину прослизання (шляху тертя) на кордоні контакту шихти з валками можна охарактеризувати через величину деформації (ущільнення) шихти. У поперечному перерізі осередку деформації (рис. 2.7 і 2.8) з ростом тиску пресування p_1, p_2 на контактних поверхнях зростає величина нормальних p_{1n}, p_{2n} та дотичних p_{1t}, p_{2t} напружень. Відповідно, зростають значення напружень від сил тертя p_{1mp} та p_{2mp}, так як вони визначаються коефіцієнтом зовнішнього

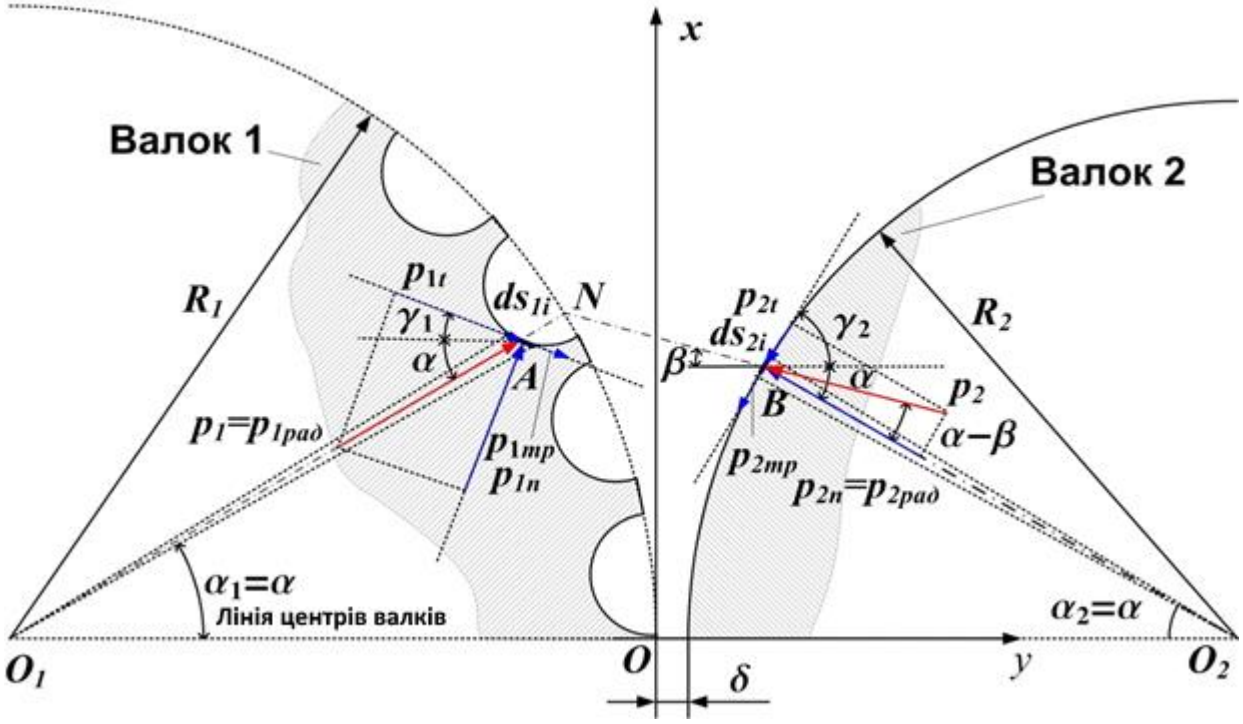
тертя шихти і величиною нормальних контактних напружень. Величина контактних напружень залежить не тільки від тиску пресування, а й від конфігурації формуючих елементів, а саме, визначається положенням площадки контакту щодо направлення дії тиску пресування. Для бандажів з зубчасто-жолобчастою конфігурацією формуючих елементів слід окремо розглянути схему діючих контактних напружень для осередку (рис. 2.7а, валок 1) та для жолобу (рис. 2.7а, валок 2). З причини малої величини кута α - β цілком допустимо прийняти, що $p_{2n}= p_2$, а значення її дотичній складової p_{2t} дорівнює нулю, тобто дотичні контактні напруги за дугою пресування в жолобі відсутні. Для бандажів з лінзоподібної конфігурацією формуючих елементів (рис. 2.8) значення контактних напружень для валка 1 і валка 2 по абсолютній величині рівні між собою через симетричність калібрування. Аналітичні вирази для визначення p_1, p_2, p_{1n}, p_{2n}, p_{1mp}, p_{2mp}, p_{1t} та p_{2t} наведено в роботі [87]. Розглядаючи поздовжні перерізи, за аналогією з прокаткою металевих порошків, приймаємо припущення, що переважно шихта рухається в напрямку, перпендикулярному осям валків, тобто у напрямку їх обертання. Тоді деформаціями шихти вздовж поверхонь бандажів можемо знехтувати. З урахуванням прийнятого допущення отримуємо, що для зубчасто-жолобчастої конфігурації в поздовжньому перетині бандажів діятимуть контактні напруження $p_{1прод.}$, $p_{1прод.}$ (рис. 2.7б, 2.8б), спрямовані перпендикулярно осі валка. При обертанні валків значення $p_{1прод.}$ та $p_{1прод.}$ плавно зростають і, наближаючись до лінії центрів валків, досягають свого максимуму. Для зубчасто-жолобчастої конфігурації формуючих елементів в поздовжньому перетині напруження визначаються наступним чином. В околиці зуба напруження рівні:

$$p_{1прод.} = p_{1n} \cdot Sin(\alpha + \gamma_1)). \qquad (2.3)$$

Величина нормальних контактних напружень на жолобі:

$$p_{2прод.} = p_2 = p_{2n}. \qquad (2.4)$$

а.



б.

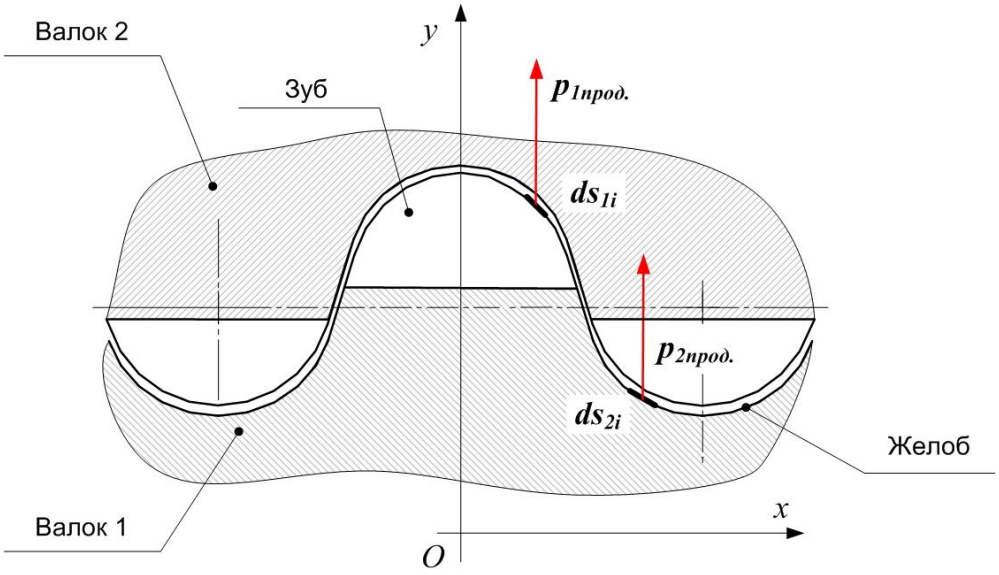
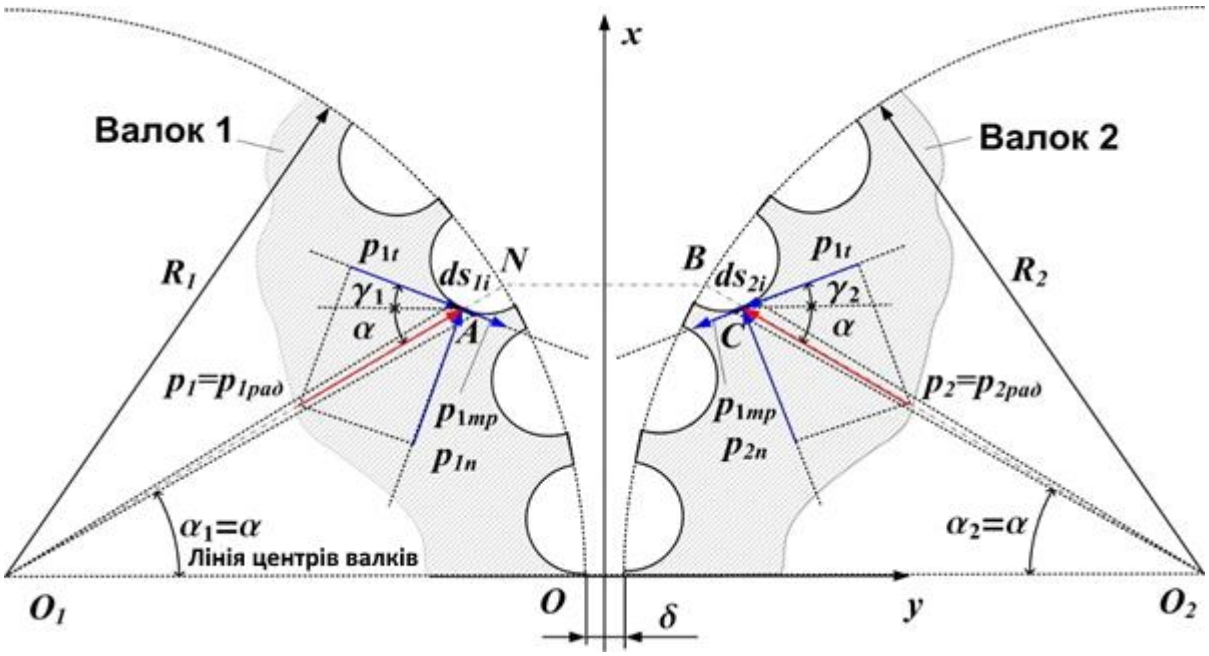


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема для визначення контактних напружень, що виникають на робочих поверхнях бандажів з зубчасто-жолобчастою конфігурацією формуючих елементів

а – поперечний перетин; б – повздовжній перетин

а.



б.

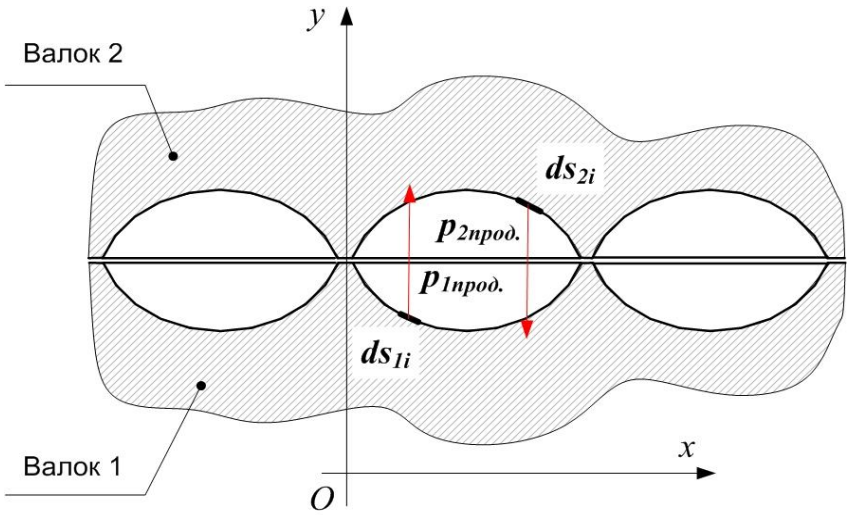


Рисунок 2.8 – Розрахункова схема для визначення контактних напружень, що виникають на робочих поверхнях бандажів з лінзоподібної (подушкообразной) конфігурацією формуючих елементів

а – поперечний перетин; б – повздовжній перетин

Для лінзоподібної конфігурації величина контактних напружень в поздовжньому перетині визначається наступним чином:

$$p_{1прод.} = p_{2прод.} = p_1. \quad (2.5)$$

Зміну величини контактних напружень на робочій поверхні бандажів найзручніше представити графічно у вигляді епюр. Для цього був використаний наступний спосіб побудови епюр. Для побудови епюр в поперечному перетині осередку деформації (рис. 2.9а, 2.10а) робоча поверхня бандажа представлена у вигляді набору елементарних контактних майданчиків ds_i. Кількість контактних майданчиків за дугою пресування визначається виходячи з величини кута пресування.

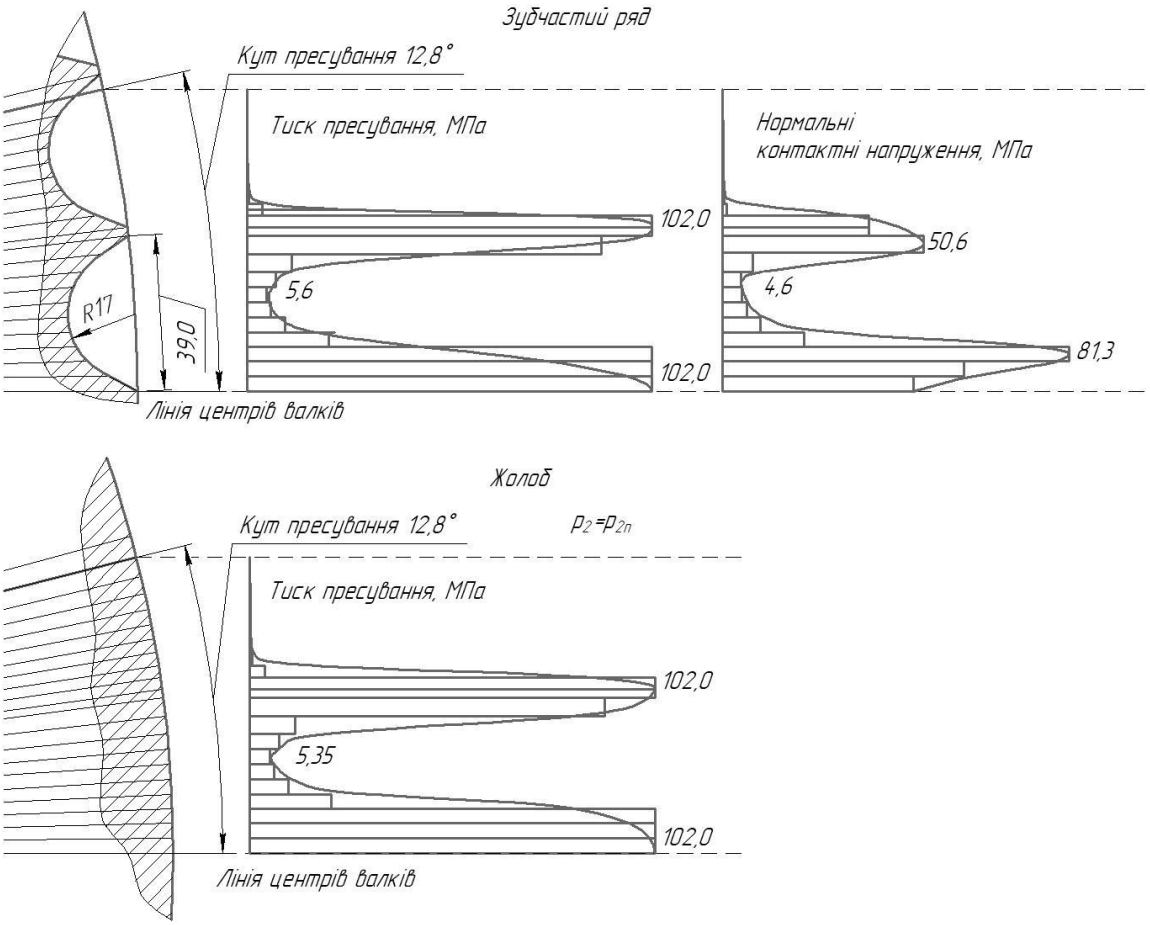
Для кожної площадки, на які розбиті формуючі елементи з урахуванням її положення в осередку деформації, визначаються значення контактних напружень. У відомих математичних моделях для визначення величини лінійного зносу використовуються значення нормальних контактних напружень, а напруження від сил тертя враховані за допомогою різних коефіцієнтів (в складі яких відображені і коефіцієнти тертя). Тому виконувалася побудова епюр нормальних контактних напружень p_{1n}, p_{2n} в поперечному перетині і $p_{1прод.}$, $p_{1прод.}$ – в породільному перетині.

Спочатку кожна епюра будується в вигляді гістограми відповідно до прийнятої схеми розбиття контуру формуючого елемента на елементарні площадки. Далі, з використанням NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline, нерегулярний раціональний B-сплайн) гістограма замінюється безперервною кривою.

На рис. 2.9, 2.10 показані епюри контактних напружень на робочих поверхнях бандажів з формуючими елементами зубчасто-жолобчастої і лінзоподібної конфігурацій для умов брикетування шихти, що складається з 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного.

Для побудови епюр в повздовжньому перетині (рис. 2.9б, 2.10б) прийнято, що контактні напруги розподілені рівномірно по контуру робочої поверхні бандажа і їх величина визначається виходячи з максимальних значень $p_{1прод.}$ та $p_{1прод.}$.

а.



б.

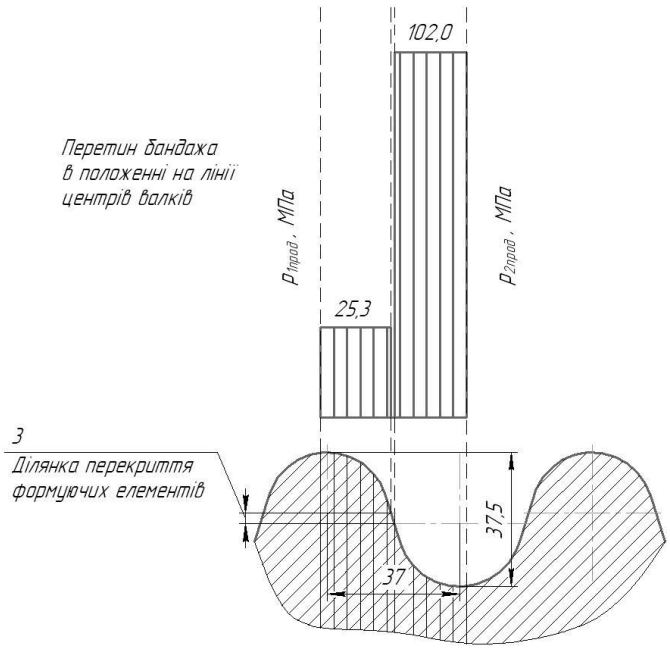
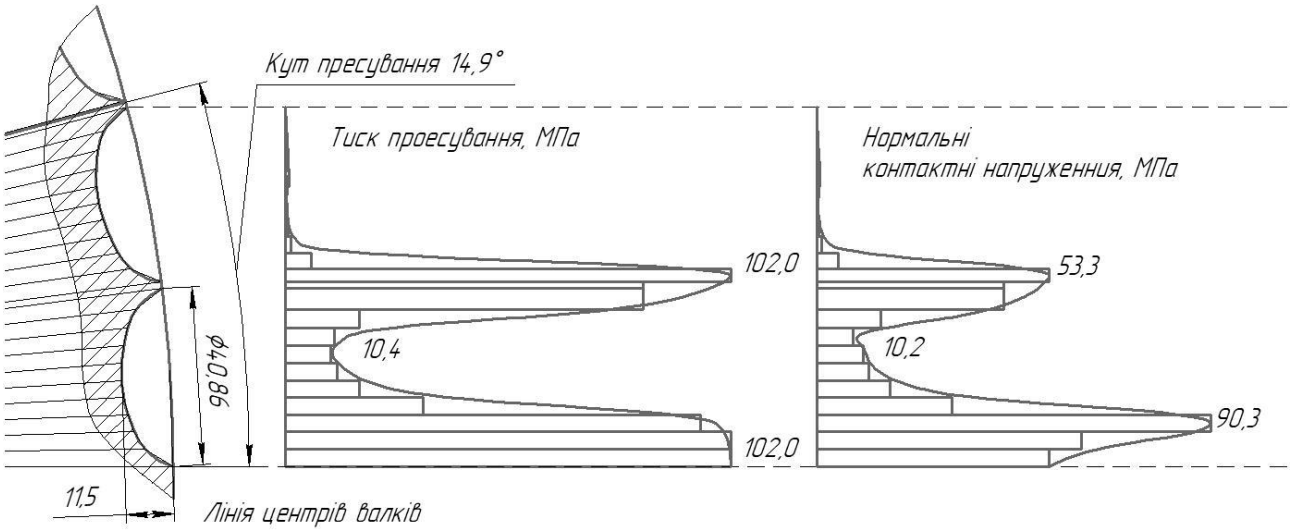


Рисунок 2.9 – Епюри контактних напружень для бандажа з зубчасто-жолобчатими елементами F2; шихта - 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

а – поперечний перетин; б – повздовжній перетин

а.



б.

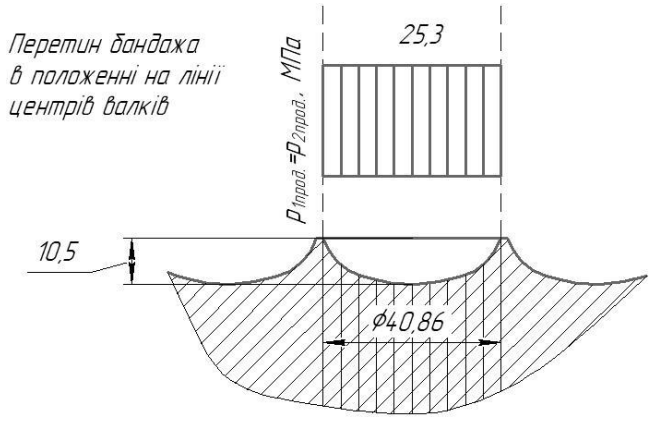


Рисунок 2.10 – Епюри контактних напружень для бандажа з лінзоподібної конфігурацією формуючих елементів F3; шихта - 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

а – поперечний перетин; б – повздовжній перетин

Як видно з малюнків, при однакових максимальних значеннях тиску пресування (102 МПа) величина і розподіл нормальних контактних напружень p_{1n} и p_{2n} для зубчасто-жолобчастих і лінзоподібних формуючих елементів різна. На робочій поверхні з лінзоподібними формуючими елементами максимальні значення нормальних контактних напружень менше, ніж для зубчасто-жолобчастої конфігурації. Слід зазначити, що найбільші значення контактних напружень як в поперечному, так і в поздовжньому перетинах спостерігаються

на жолобі і складають 102 МПа. Таким чином, для зубчасто-жолобчастої конфігурації формуючих елементів на жолобі можна виділити локальні ділянки підвищеного зносу, що характеризуються високими значеннями нормальних контактних напружень.

Аналіз епюр, як за величиною, так и за розподілом контактних напружень, показує, що лінзоподібна конфігурація формуючих елементів має більш сприятливі умови зношування в порівнянні з зубчасто-жолобчастою. На величину і розподіл контактних напружень впливають властивості ущільнюваної шихти. На рис. 2.11 представлені епюри контактних напружень на робочих поверхнях бандажів з формуючими елементами зубчасто-жолобчастої конфігурації для умов брикетування шихти, що складається з 85% коксового дріб'язку, 7,5% вапна і 7,5% меляси.

Шихта на основі силікомарганцю має більший опір стисненню, ніж шихта на основі коксового дріб'язку. Як видно з рис. 2.12, при брикетуванні шихти на основі коксового дріб'язку максимальні значення контактних напружень менше, ніж при брикетуванні шихти на основі силікомарганцю, так на зубчастому ряді вони не перевищують 22,9 МПа, а на жолобі – 36,6 МПа.

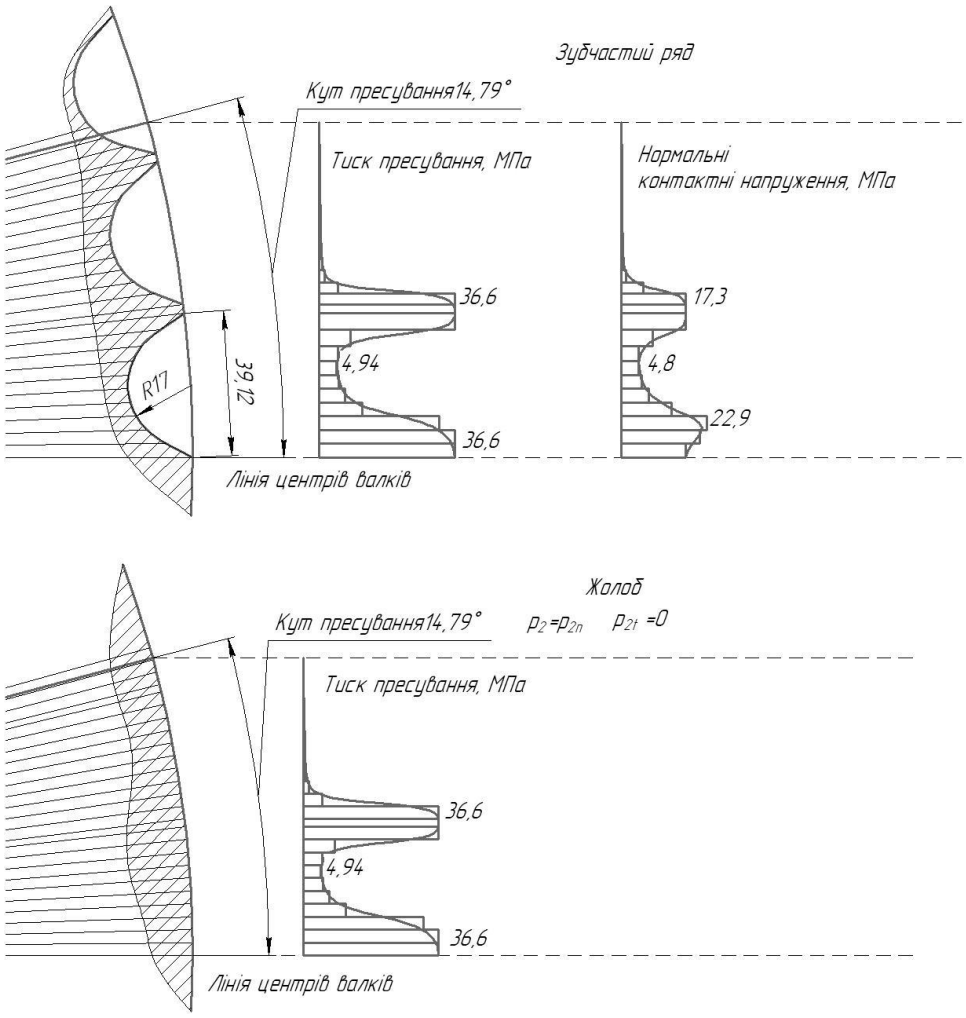
Розглянуті приклади показують, що на величину і розподіл контактних напружень на робочих поверхнях бандажів валкових пресів, а, відповідно, на знос бандажів істотний вплив надає конфігурація формуючих елементів та властивості шихти.

Побудова і аналіз епюр дозволяють для конкретних шихт з урахуванням їх властивостей прогнозувати величину і характер зносу бандажів валкових пресів, а також, вибираючи конфігурацію формуючих елементів, впливати на умови зношуваності бандажів.

Таким чином, на основі виконаного аналізу сил, що діють в осередку деформації валкового преса, розроблені розрахункові схеми, аналітичним шляхом за допомогою програмних засобів визначені контактні напруги і побудовані їх епюри. Отримані епюри дають можливість визначити величину і розподіл контактних напружень на робочих поверхнях бандажів. Виконані

дослідження силової взаємодії бандажів з ущільнюваним матеріалом будуть використані для розробки методів прогнозування та оцінки зносу бандажів.

а.



б.

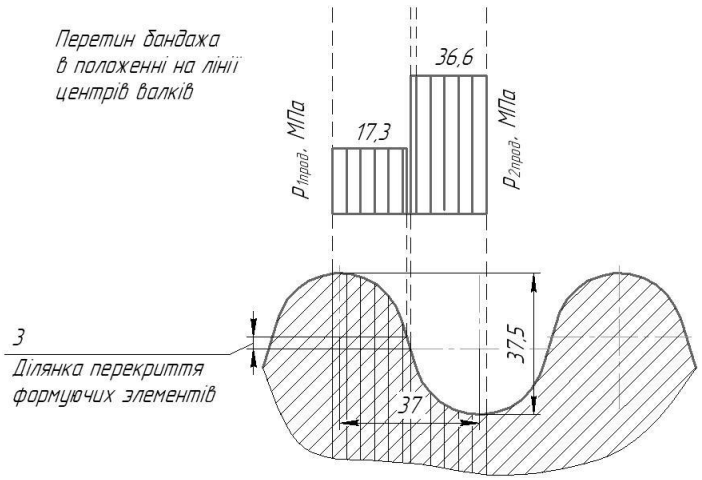


Рисунок 2.11 – Епюри контактних напружень в поперечному перерізі бандажа з зубчасто-жолобчастою конфігурацією формуючих елементів F2; шихта - 85% коксового дріб'язку, 7,5% вапна і 7,5% меляси

2.3. Дослідження впливу ступеня зносу бандажів валкових пресів на параметри брикетування

2.3.1. Розробка математичної моделі зносу бандажів

Викладеної в розділі 2.1.3 системою досліджень передбачено застосування топограм зносу бандажів для вирішення завдання прогнозування і оцінки параметрів роботи валкового преса при різному ступеню зносу бандажів. Топограми представляють собою графічне відображення профілів бандажів, побудованих для різних стадій зносу із заданою дискретністю. Для їх отримання необхідно розробити математичну модель визначення величини зносу і метод її використання при побудові профілів бандажів (координат точок контурів робочих поверхонь), що утворюються в результаті їх зносу.

Різноманітність, а іноді і суперечливість даних, наявних в технічній літературі про механізм зношування деталей машин, ускладнює розробку математичної моделі, що враховує багатофакторність процесу взаємодії бандажа і шихти в зоні пресування. Як зазначалося вище, найбільш відповідними умовами розв'язуваної задачі є моделі зносу прокатних валків [144,145]. Ці моделі базуються на відомих теоріях зносу [115,117].

Хольм, Барвелл, Стронг, Арчард і Хірст розглядають механізм зносу, як адгезійний процес. Так, наприклад, Хольм, виходячи з атомарного механізму зношування, розраховує об’єм зношеного матеріалу на одиничному шляху тертя [152], за формулою:

$$W = z\frac{N}{HB}, \qquad (2.6)$$

де z – ймовірність видалення атома з поверхні при зустрічі його з атомом контртіла; N – нормальне навантаження; HB – твердість матеріалу за Брінеллем.

На думку Барвелла і Стронга, не всяка фрикційна взаємодія твердих тіл в зонах фактичного контакту призводить до зносу [153]. Ними висунуто припущення, що знос залежить від межі текучості матеріалу деталі, що зношується, тому для визначення величини лінійного зносу справедливим є співвідношення:

$$\Delta h = K_a \frac{p_a}{\sigma_T} s, \tag{2.7}$$

де K_a – ймовірність утворення частинок зносу при терті; p_a – номінальний тиск на контакті; σ_T – межа плинності матеріалу деталі; s – шлях тертя.

Арчард і Хірст [115], розвиваючи адгезійну теорію зносу, пропонують розрахункову формулу, засновану на гіпотезі про лінійну залежність між об'ємним зносом W і роботою сил тертя A:

$$W = k_V A, \tag{2.8}$$

де k_v – коефіцієнт об'ємного зносу; A – робота сил тертя;
або

$$W = \frac{k}{3} \frac{N}{HB}, \tag{2.9}$$

де k – ймовірність відділення частинки матеріалу з плями контакту.

Таким чином, згідно з адгезійною теорією, описану аналітичними виразами (2.6-2.9), знос визначається силами молекулярної взаємодії. Для процесів адгезії характерним є відрив і перенесення частинок (молекул) тел, що утворюють пару тертя [117].

Аналіз представлених рівнянь показує, що вони не враховують ряд факторів, що визначають знос при брикетуванні – властивості шихтових матеріалів, конфігурацію робочої поверхні бандажів, технологічні параметри процесу.

Особливість процесу зносу бандажів валкових пресів полягає в тому, що тілами, які руйнують, є тверді частинки шихти, що брикетується, тому поверхня фрикційної взаємодії являє собою сукупність плям контактів, кількість і характер яких постійно змінюється. Зношування бандажів валкових пресів відбувається в результаті багаторазового пружного і пластичного деформування одних і тих же мікрооб'ємів матеріалу робочої поверхні на контактах з твердими частинками шихти, яке викликає втомне руйнування поверхневого шару. При цьому процесами адгезії і схоплювання можна знехтувати. З огляду на сказане, для створення моделі зносу, яка б відображала умови механічної взаємодії частинок шихти з робочими поверхнями бандажів, найкращим є використання молекулярно-механічної теорії тертя і втомної теорії зносу твердих тіл, яка була розроблена під керівництвом І.В. Крагельського [154].

В основі молекулярно-механічної теорії тертя лежить уявлення про дискретності контакту твердих тіл і розвитку на цих контактах деформаційних процесів. Тому допустимо використання аналітичних залежностей молекулярно-механічної теорії тертя і втомної теорії в якості вихідних при розробці математичної моделі зносу бандажів. Виконавши адаптацію цих залежностей до умов брикетування, можна отримати математичну модель оцінки зносу бандажів.

У цій теорії у якості характеристик зносу використовуються інтенсивність зношування I_h і питома інтенсивність зношування, що визначаються наступними співвідношеннями [154, 118]:

$$I_h = \frac{dh}{dS} = \frac{dW}{A_T\ dS}, \tag{2.10}$$

де h, W – лінійний або об'ємний знос, відповідно; S – шлях тертя; A_T – номінальна площа тертя.

$$i_h = \frac{V_D}{n_{kr} A_r d_k}, \tag{2.11}$$

де V_D – деформований об'єм зношуваного матеріалу, який руйнується після n_{kr} циклів фрикційної взаємодії; A_r – фактична площа контакту; d_k – середній діаметр плями контакту.

Інтенсивність зношування I_h є характеристикою всієї поверхні тертя, а питома інтенсивність зношування i_h – одиничної плями контакту.

У вираз (2.11) для визначення питомої інтенсивності зношування входять характеристики фрикційного контакту. Це дозволяє при розробці математичної моделі для оцінки зносу, адаптованої до умов брикетування, врахувати властивості контактуючих матеріалів і умови взаємодії бандажів валкових пресів з шихтою, що брикетується.

Величина i_h визначається механічними властивостями матеріалу бандажа та шихти що брикетується, в першу чергу, її гранулометричним складом. З огляду на різноманіття механічних властивостей матеріалів що брикетуються та значні коливання характеристик (наприклад, коливання гранулометричного складу шихти навіть для одного і того ж матеріалу), кращим є експериментальне визначення значення питомої інтенсивності зношування.

Між інтенсивністю зношування I_h і питомою інтенсивністю зношування i_h виконується співвідношення [154, 118]:

$$I_h = i_h \frac{A_r}{A_a} = i_h \frac{p_a}{p_r}, \qquad (2.12)$$

де A_a – номінальна площа контакту; p_r – фактичний тиск на контакті.

Дослідження, наведені в роботі [119], показують, що при пластичній деформації в першому наближенні можна прийняти:

$$p_r \approx HB. \qquad (2.13)$$

З урахуванням (2.12) вираз (2.13) для визначення інтенсивності зношування можна записати у вигляді:

$$I_h = i_h \frac{p_a}{HB}, \tag{2.14}$$

Вираз (2.14) враховує вплив механічних властивостей матеріалу бандажів на інтенсивність їх зносу.

Номінальна площа контакту A_a дорівнює площі ділянки робочої поверхні бандажів, що знаходиться в осередку деформації, величина якої визначається кутом пресування або довжиною дуги пресування. Тоді величина номінального тиску на контакті p_a дорівнює величині нормальної складової p_n контактних напружень, обумовлених опором шихти стиску, і вираз (3.14) можна записати в наступному вигляді:

$$I_h = i_h \frac{p_n}{HB}, \tag{2.15}$$

У розділі 2.3 приведена розрахункова схема визначення контактних напружень p_n, з урахуванням фізико-механічних властивостей шихтових матеріалів, розмірів і конфігурації робочої поверхні бандажа.

З огляду на, що валки преса обертаються з постійною частотою, вирази (2.10) можемо записати у вигляді:

$$I_h = \frac{dh}{dS} = \frac{h}{S}. \tag{2.16}$$

Робоча поверхня бандажів має складну криволінійну конфігурацію, тому для кожної точки робочої поверхні величина контактних напружень p_n і шлях тертя за один оборот S буде різною. Кожній точці робочих поверхонь бандажів буде відповідати своє значення інтенсивності зношування I_h. Цим і визначається нерівномірність зносу робочих поверхонь бандажів.

Спільне рішення рівнянь (2.15) і (2.16) дозволяє отримати вираз для визначення величини лінійного зносу:

$$h = i_h \frac{p_n}{HB} S\,. \qquad (2.17)$$

Щоб врахувати вплив зміни поверхні на нерівномірність зношування, контур формуючого елемента в поперечному і поздовжньому перетині розбивається на певну кількість контактних майданчиків. За допомогою виразу (2.17) для кожного з таких майданчиків визначається величина лінійного зносу.

Так, як валки обертаються, то кожна точка робочої поверхні бандажів контактує з шихтою в осередку деформації за дугою пресування періодично, тому величина шляху тертя S може бути виражена через кількість обертів валків і шлях, який проходить ця точка дугою пресування за один оборот валків. Для будь-якої точки робочої поверхні бандажа величина шляху тертя визначається виразом:

$$S = S_1 n_p\,, \qquad (2.18)$$

де S_1 – довжина шляху, який проходить контактна площадка за дугою пресування за один оборот валка; n_p – кількість обертів валка.

З урахуванням (2.18) вираз (2.17) набуде вигляду:

$$h = i_h \frac{p_n}{HB} S_1 n_p\,. \qquad (2.19)$$

Значення S_1 для будь-якої точки контуру робочої поверхні бандажа можна виразити через радіус R, який визначає положення точки контуру робочої поверхні бандажа щодо осі валка, і кут пресування α наступним чином:

$$S_1 = \frac{\pi R \alpha}{180^\circ} \qquad (2.20)$$

З урахуванням (3.20) вираз (3.17) набуде вигляду:

$$h = i_h \frac{p_n}{HB} \cdot \frac{\pi R \alpha}{180^\circ} n_p . \qquad (2.21)$$

Отриманий вираз (2.21) є математичною моделлю оцінки зносу бандажів валкових пресів. Розроблена модель є складовою частиною методу побудови топограм і застосування їх для оцінки допустимості експлуатації бандажів при різному ступеню зносу. Як вже зазначалося, топограми зносу є графічним відображенням контуру робочої поверхні зношених бандажів. Для отримання сукупності графічно побудованих зношених контурів бандажів необхідно задатися дискретністю їх побудови. В якості параметри, що задають дискретність побудови топограм, прийняті періоди експлуатації бандажів, які визначаються кількістю оборотів валків преса n_p. Використовуючи отриману математичну модель, для контактних площадок, на які розбивається контур формуючого елемента, визначається величина лінійного зносу. Знаючи координати вихідного контуру і величину лінійного зносу, можна визначити координати точок, що належать новому (утвореному в результаті зносу) контуру поверхні бандажа. Відповідно до прийнятої дискретності за цими точками виконується побудова профілів робочої поверхні бандажа при різного ступеня зносу.

2.3.2. Розробка методу дослідження впливу зносу бандажів на параметри брикетування за допомогою топограм зносу

На рис. 2.12 приведена схема методу застосування розробленої математичної моделі для визначення координат точок, що належать контуру

зношеного бандажа, і побудови топограм зносу. Відповідно до цієї схеми створені розрахункові та графічні програми побудови топограм зносу.

На рис. 2.13 представлена схема методу застосування топограм для дослідження впливу ступеня зносу бандажів на технологічні і енергосилові параметри брикетування.

Значення питомої інтенсивності зношування бандажів в роботі визначалося експериментальним шляхом. Для цього використані дані про знос кількох комплектів бандажів, які відпрацювали повний період експлуатації в умовах ВАТ «Нікопольський завод феросплавів» і на підприємстві «Завод з виробництва брикетів для металургійної промисловості ООО Конкрет».

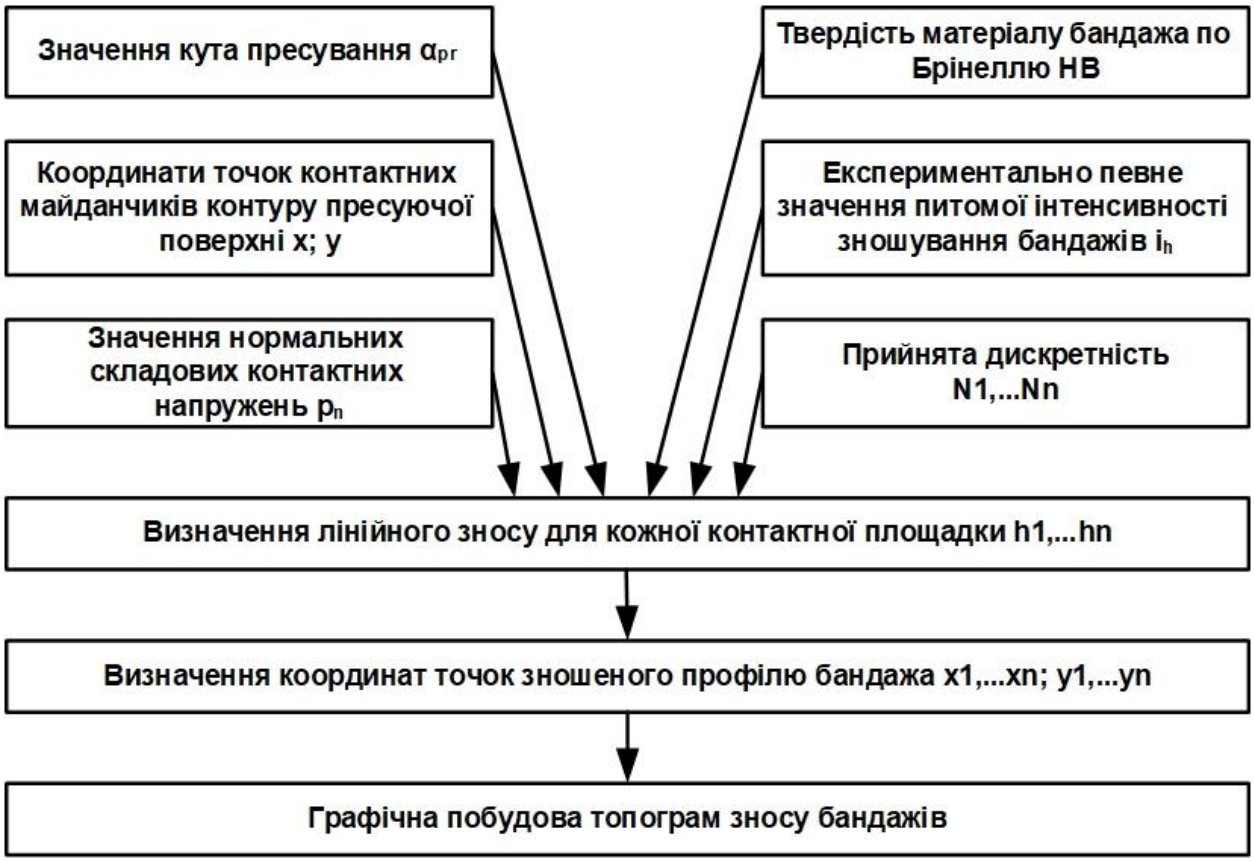


Рисунок 2.12 – Схема методу застосування математичної моделі для побудови топограм зносу бандажів

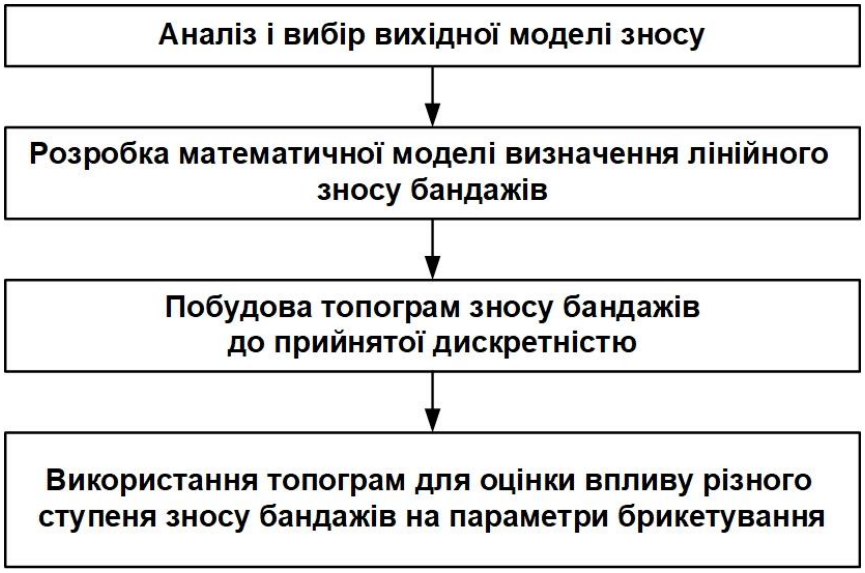


Рисунок 2.13 – Схема методу застосування топограм зносу бандажів для оцінки впливу зносу бандажів на параметри брикетування

Заміривши величину лінійного зносу бандажа в точках формуючого профілю, за допомогою виразу (2.21) визначали значення i_h.

У виробничих умовах властивості шихти, що брикетується, непостійні і змінюються в межах величин, встановлених технологічним регламентом на виробництво брикетів. Деякі з досліджених комплектів бандажів експлуатувалися в умовах брикетування різних шихт. Тому, виходячи з отриманих практичних даних, було визначено усереднене значення питомої інтенсивності зношування i_h для бандажів валкових пресів, рівне $6{,}642\times10^{-5}$, яке і використано в розрахунках. Надалі планується створення спеціальної лабораторної установки і виконання з її використанням експериментальних досліджень взаємодії різних шихт і матеріалів бандажів. Це дозволить уточнити значення питомої інтенсивності зношування для конкретних умов експлуатації бандажів і безпосередньо перейти до розробки методів прогнозування розвитку в часі зносу бандажів валкових пресів.

Як приклад, в табл. 2.4 і 2.5 і на рис. 2.14, 2.15 наведені результати розрахунків і побудовані топограми для бандажа з зубчасто-жолобчастою конфігурацією формуючих елементів F2 (див. Розділ 2.2.2, табл. 2.3).

Таблиця 2.4 – Розрахункові дані для побудови топограми зносу бандажа в поперечному перерізі

Конфігурація формуючих елементів: F2 зубчасто-жолобчаста

Шихта: 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

Контактні майданчики	Точки контуру формуючого елемента	Величина лінійного зносу, мм				
		n_p=20000об.	n_p=40000об.	n_p=60000об.	n_p=80000об.	n_p=100000об.
I	1	0,708	1,416	2,124	2,833	3,541
	2	0,687	1,376	2,063	2,751	3,439
II	3	0,750	1,500	2,250	3,001	3,752
III	4	0,694	1,389	2,083	2,778	3,472
IV	5	0,372	0,745	1,117	1,489	1,861
V	6	0,150	0,299	0,449	0,598	0,748
VI	7	0,090	0,180	0,270	0,360	0,450
VII	8	0,074	0,147	0,221	0,295	0,368
VIII	9	0,085	0,170	0,256	0,341	0,426
IX	10	0,189	0,379	0,568	0,757	0,947
X	11	0,565	1,131	1,696	2,261	2,827
	12	0,708	1,416	2,124	2,833	3,541

Таблиця 2.5 – Розрахункові дані для побудови топограми зносу бандажа в поздовжньому перетині

Конфігурація формуючих елементів: F2 зубчасто-жолобчаста

Шихта: 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

Контактні майданчики	Точки контуру формуючого елемента	Величина лінійного зносу, мм				
		n_p=20000об.	n_p=40000об.	n_p=60000об.	n_p=80000об.	n_p=100000об.
I	1	0,708	1,416	2,124	2,833	3,541
II	2	0,707	1,415	2,122	2,829	3,536
III	3	0,705	1,409	2,114	2,818	3,523
IV	4	0,700	1,399	2,100	2,798	3,498
V	5	0,690	1,381	2,071	2,761	3,452
	6	0,673	1,346	2,019	2,692	3,365
VI	7	1,400	2,800	4,198	5,598	6,997
	8	1,365	2,730	4,096	5,461	6,826
VII	9	1,341	2,681	4,022	5,363	6,703
VIII	10	1,331	2,661	3,991	5,322	6,653
IX	11	1,325	2,650	3,976	5,301	6,626
X	12	1,324	2,647	3,970	5,294	6,617

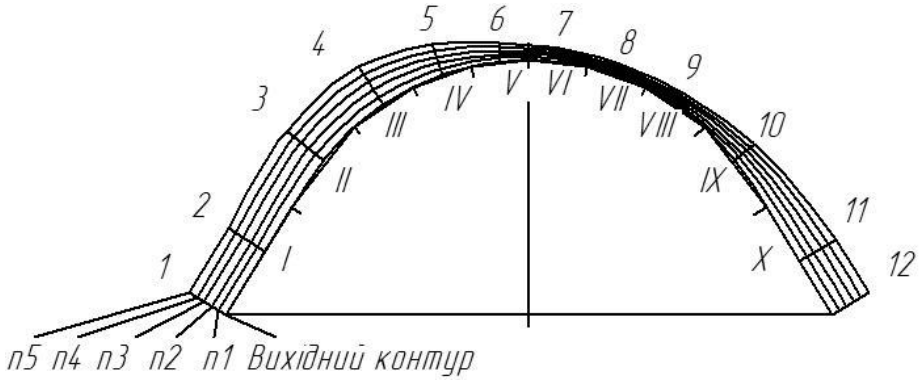


Рисунок 2.14 – Топограма зносу формуючого елементу в поперечному перетині

Конфігурація формуючих елементів: F2 зубчасто-жолобчаста

Шихта: 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

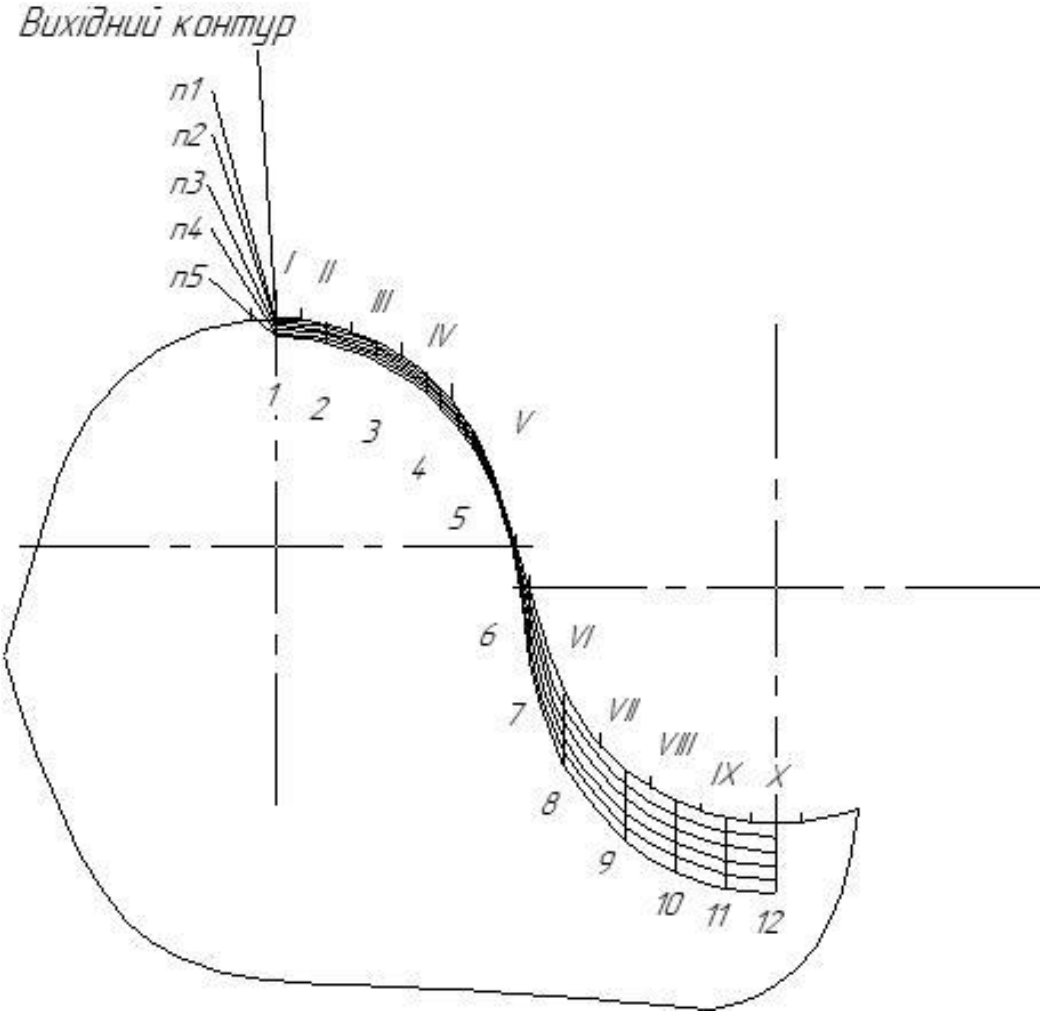


Рисунок 2.15 – Топограма зносу формуючого елементу в поздовжньому перетині

Конфігурація формуючих елементів: F2 зубчасто-жолобчаста

Шихта: 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

Дискретність побудови топограмм визначається періодами експлуатації бандажів і задається кількістю оборотів валків преса. Побудовано топограми для п'яти ступенів зносу: 1 – n_p = 20000 обертів; 2 – n_p = 40000 обертів; 3 – n_p = 60000 обертів; 4 – n_p = 80000 обертів; 5 – n_p = 100000 обертів.

Отримані результати показують, що розроблена математична модель дозволяє визначити величину лінійного зносу і побудувати профілі зношених бандажів з урахуванням фізико-механічних характеристик шихтових матеріалів, властивостей матеріалу бандажа, конфігурації формуючих елементів. Таким чином, створено новий метод аналітичного дослідження зносу бандажів валкових пресів при різному ступеню їх зносу за допомогою топограм. Реалізація цього методу дозволяє отримати сукупність профілів бандажів на різних стадіях зносу (топограм) та використовувати їх для встановлення аналітичних и графічних взаємозв'язків між величиною зносу бандажів и параметрами брикетування.

2.3.3. Розрахунково-аналітичне визначення параметрів брикетування для зношених формуючих елементів

У розділі 2.3.2 описано створений метод аналітичного дослідження зносу бандажів валкових пресів за допомогою топограм. Цей метод включає визначення геометричних параметрів робочих контурів бандажів при різному ступеню зносу і графічне представлення їх у вигляді топограм.

У якості показника ступеня зносу бандажів приймаємо величину зазору між робочими поверхнями валків, яка визначається відповідно з наведеною на рис. 3.16 схемою.

Величина зазору між робочими поверхнями валків (рис. 2.16) визначається виразом: $\delta = \delta_0 + h1 + h2$, де δ_0 – початковий зазор між валками; $h1$ и $h2$ – величина лінійного зносу робочих поверхонь валків 1 і 2, відповідно.

Використовуючи побудовані для п'яти ступенів зносу топограми, за допомогою розробленого раніше розрахунково-аналітичного апарату [87]

розраховуються значення коефіцієнта ущільнення *Ку*, щільності брикетів ρ_{br}, зусилля пресування *P* і моменту пресування *M*.

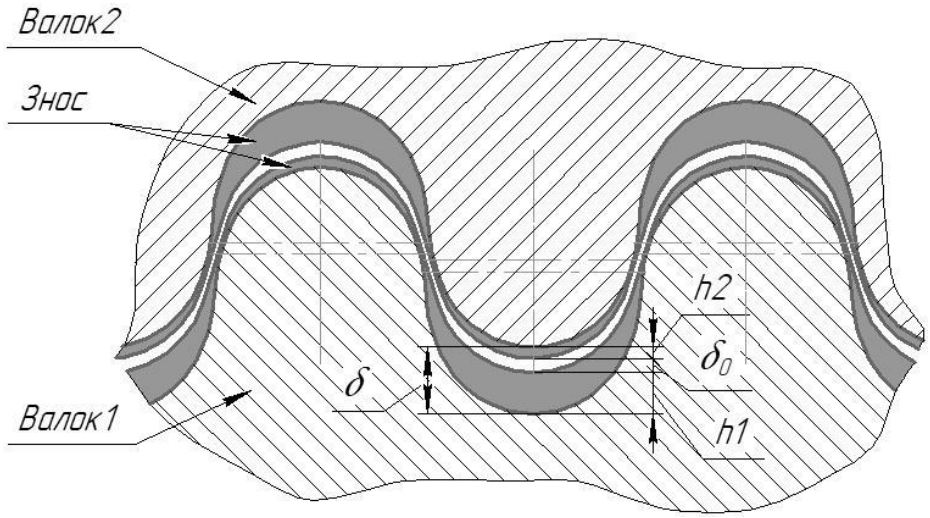


Рисунок 2.16 – Схема визначення зазору між валками з урахуванням їх зносу для бандажів з формуючими елементами зубчасто-жолобчастої конфігурації

Як приклад, в табл. 2.6 і 2.7 наведені результати розрахунків для двох досліджуваних в роботі шихт з різними фізико-механічними властивостями і бандажів з зубчасто-жолобчастою конфігурацією формуючих елементів F2.

Таблиця 2.6 – Розрахункові значення технологічних і енергосилових параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів

Шихта: 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

Ступінь зносу	Період експлу-атації n_p, об.	Зазор між валками δ, мм	Коефі-цієнт ущіль-нення *Ку*	Щільність брикетів ρ_{br}, г/см^3	Зусилля пресу-вання *P*, кН	Момент пресу-вання *M*, кН·м
0	0	0,5	2,318	4,660	484,0	46,7
1	20000	2,3	2,155	4,331	432,0	42,1
2	40000	4,1	2,026	4,071	322,9	31,4
3	60000	5,9	1,923	3,866	253,4	24,3
4	80000	7,8	1,836	3,690	202,8	19,2
5	100000	9,5	1,767	3,551	164,4	15,4

Таблиця 2.7 – Розрахункові значення технологічних і енергосилових параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів

Шихта: 85% коксового дріб'язку, 7,5% вапна гашеного і 7,5% меляси (ρ=1,2г/см^3)

Ступінь зносу	Період експлу-атації n_p, об.	Зазор між валками δ, мм	Коефі-цієнт ущіль-нення Ky	Щільність брикетів ρ_{br}, г/см^3	Зусилля пресу-вання P, кН	Момент пресу-вання M, кН·м
0	0	0,5	3,034	1,639	368,7	31,9
1	20000	1,8	2,825	1,525	351,3	30,7
2	40000	3,2	2,656	1,434	311,5	27,1
3	60000	4,5	2,514	1,357	267,2	23,3
4	80000	5,8	2,394	1,293	223,7	19,0
5	100000	7,2	2,292	1,238	176,2	15,1

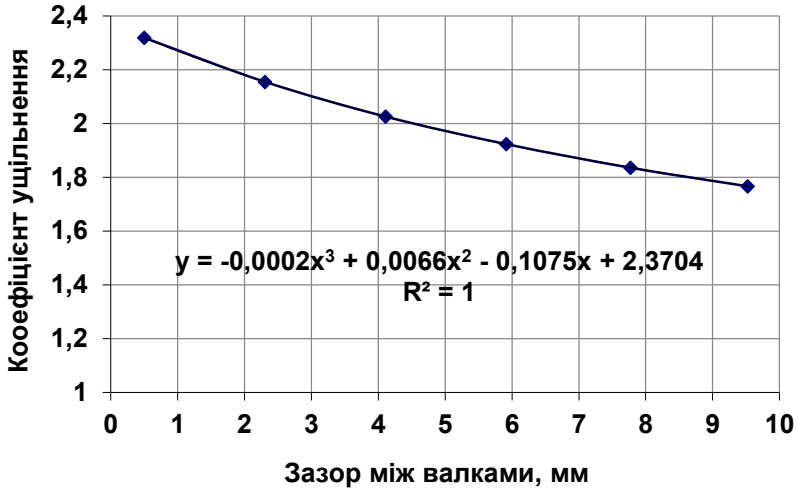
Отримані розрахункові дані відображають взаємозв'язки між величиною зносу бандажів, технологічними і енергосиловими параметрами брикетування. На графіках по осі абсцис зазначена величина зазору між пресуючими поверхнями, утвореного міжвалковим технологічним зазором і величиною зносу.

2.3.4. Встановлення взаємозв'язків між характеристиками зносу бандажів та параметрами брикетування

За даними, наведеними в табл. 2.6, 2.7, побудовані графічні залежності параметрів брикетування від величини зносу бандажів (рис. 2.17 - 2.20), які описані аналітичними виразами.

Для практичного застосування аналітичних виразів, представлених на рис 2.17-2.20, перспективним представляється метод, що дозволяє досліджувати взаємозв'язок між енергосиловими і технологічними параметрами брикетування і зносом бандажів графічним шляхом за допомогою номограм. Використання номограмм дозволить визначити максимальну величину зносу бандажів, при якій можливе отримання брикетів з заданими значеннями коефіцієнта ущільнення і щільності брикетів ρ_{br}, т. е. встановити граничний ступінь зносу, при якому допустима експлуатація бандажів.

а.



б.

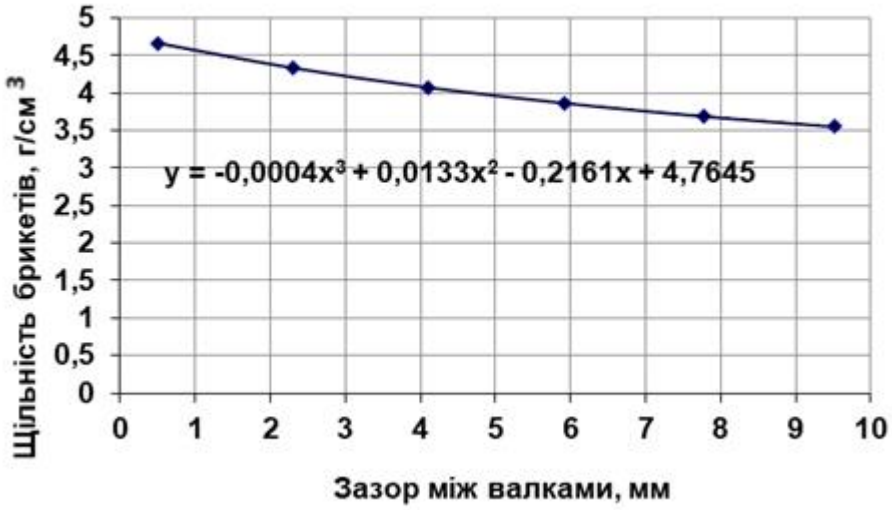
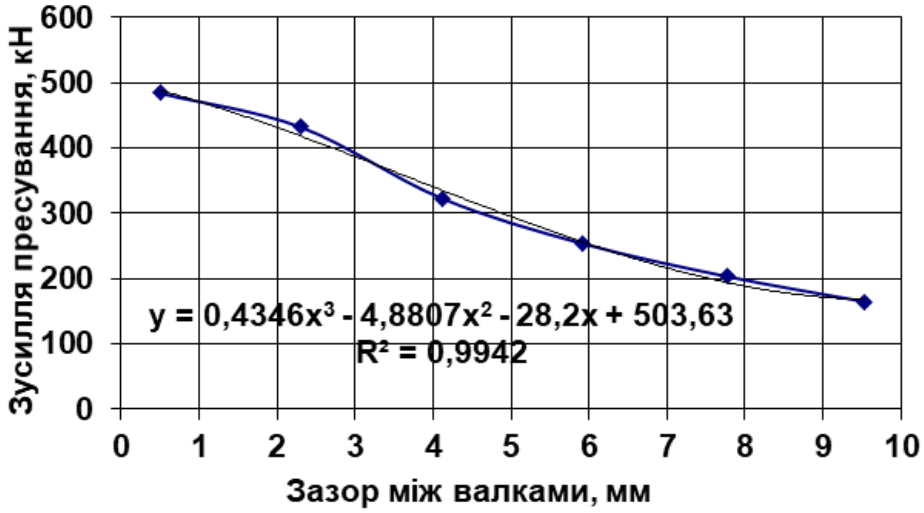


Рисунок 2.17 – Залежність параметрів ущільнення від величини зносу бандажів: а – коефіцієнт ущільнення; б – щільність брикетів. Шихта: 85% коксового дріб'язку, 7,5% вапна гашеного і 7,5% меляси (ρ=1,2г/см^3)

а.



б.

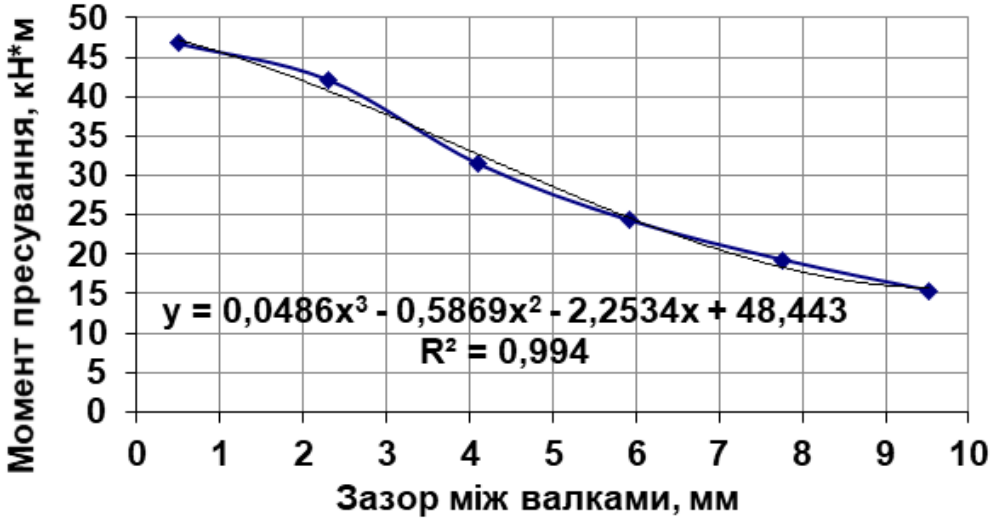
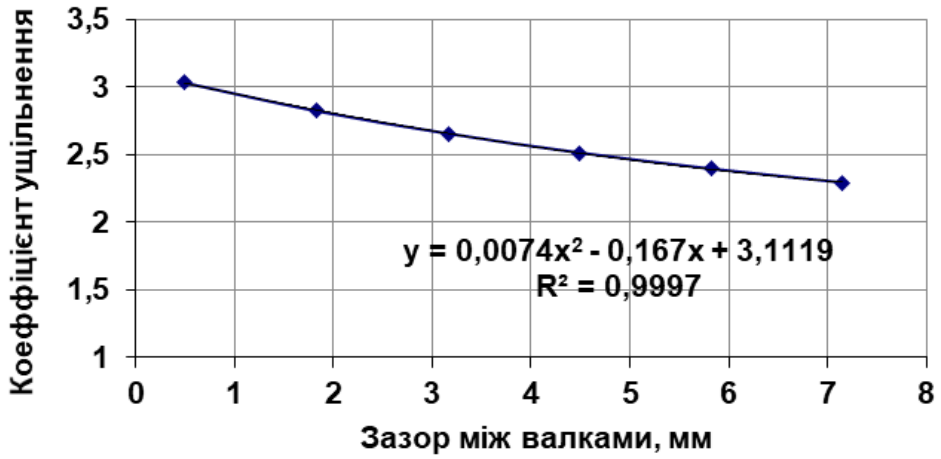


Рисунок 2.18 – Залежність енергосилових параметрів брикетування від величини зносу бандажів: а – зусилля пресування; б – момент пресування. Шихта: 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

а.



б.

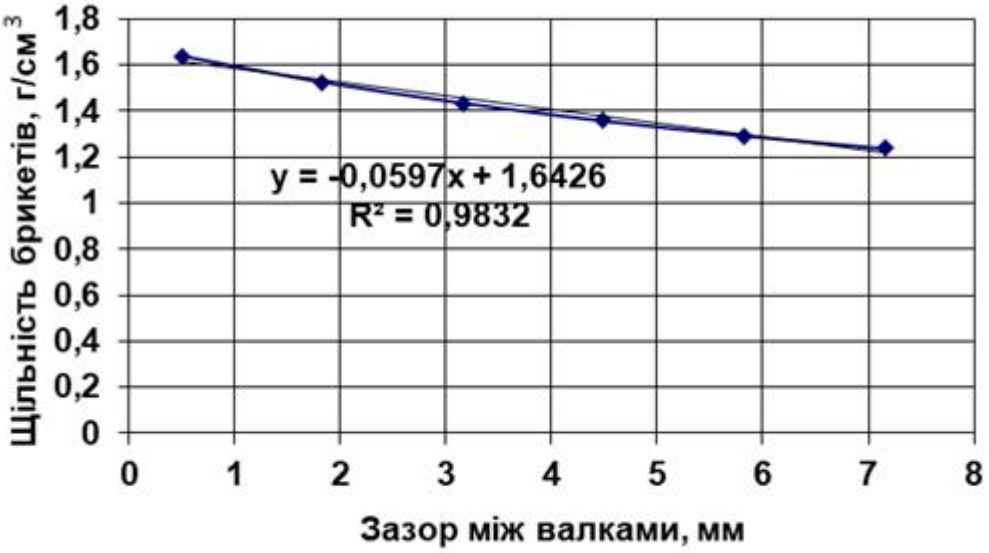
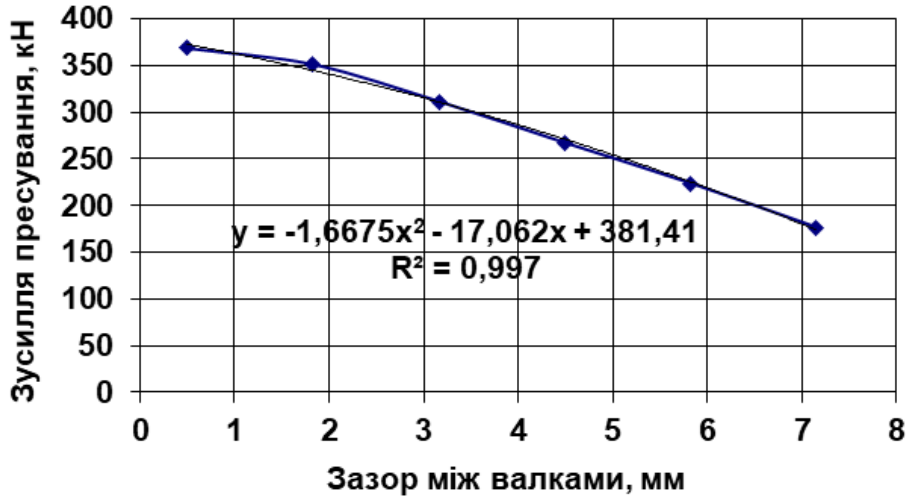


Рисунок 2.19 – Залежність параметрів ущільнення від величини зносу бандажів: а – коефіцієнт ущільнення; б – щільність брикетів. Шихта: 85% коксового дріб'язку, 7,5% вапна гашеного і 7,5% меляси (ρ=1,2 г/см^3)

а.



б.

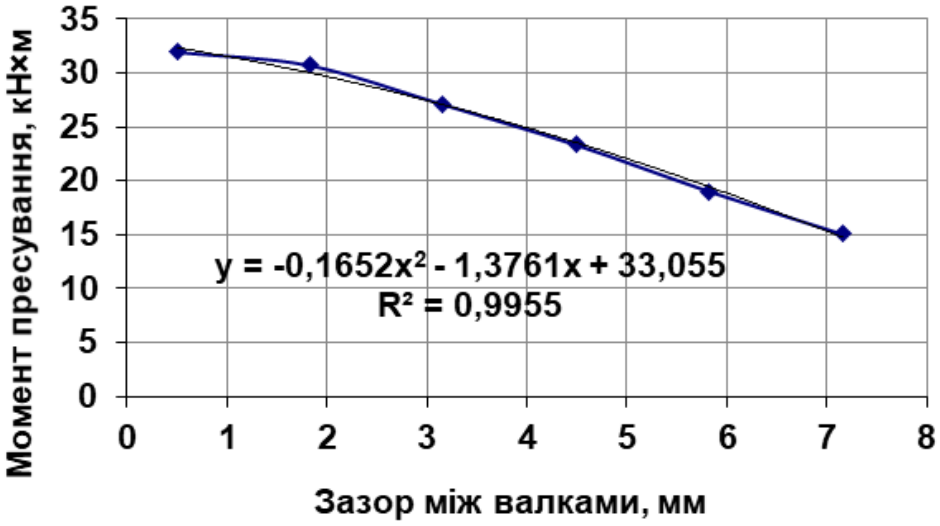


Рисунок 2.20 – Залежність енергосилових параметрів брикетування від величини зносу бандажів: а – зусилля пресування; б – момент пресування. Шихта: 85% коксового дріб'язку, 7,5% вапна гашеного і 7,5% меляси (ρ=1,2г/см^3).

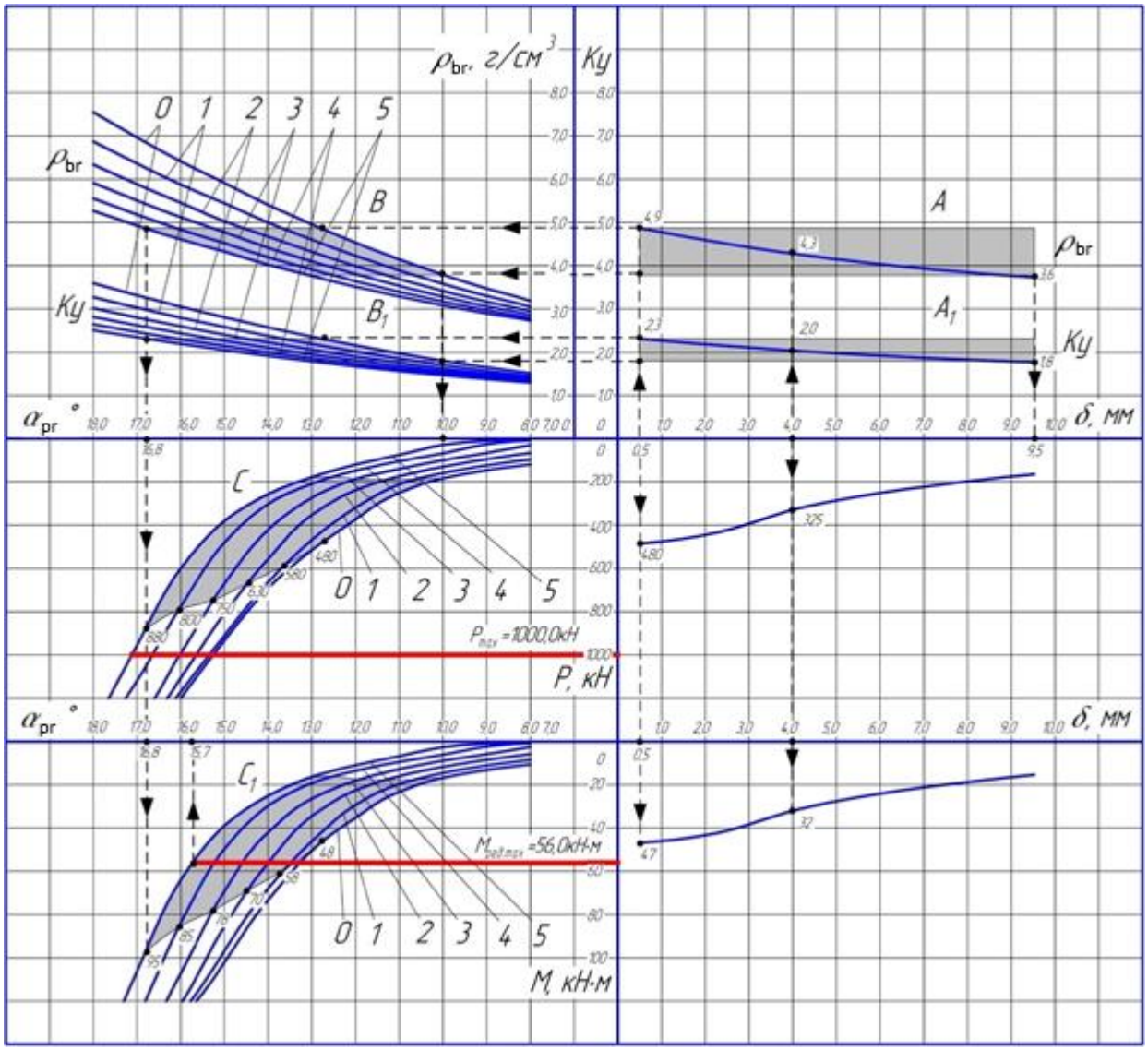


Рисунок 2.21 – Номограма параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F2

Шихта: 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного.

Як приклад, на рис. 2.21 приведена номограма, побудована для зубчасто-жолобчастою конфігурації формуючих елементів F2 і шихти, що складається 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного.

Порядок практичного застосування номограм наступний. З правого боку на номограмі показані отримані раніше графічні залежності між величиною зносу бандажів δ, коефіцієнтом ущільнення $Ку$, щільністю брикетів ρ_{br}, зусиллям

пресування P і моментом пресування M. Як видно з представлених залежностей, для вихідного (незношені формуючі елементи) контуру при δ=0,5 мм щільність брикетів ρ_{br}=4,9 г/см^3, коефіцієнт ущільнення $Ку$=2,3. При цьому енергосилові характеристики процесу наступні: P = 480 кН, M = 47 кН×м. В результаті зносу формуючих елементів збільшується зазор між валками уздовж всього контура робочих поверхонь бандажів. Це призводить до зниження показників ущільнення шихти ρ_{br}, $Ку$ та, відповідно, до зменшення значень P та M. Так, при зазоре δ=4 мм ρ_{br}=4,3 г/см^3, $Ку$= 2,0, а значення силових характеристик знижуються до P=325 кН, M = 32 кН×м.

Практичний досвід виробництва брикетів з шихти, що складається з 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного, показує, що отримання брикетів з задовільною для споживачів міцністю забезпечується, якщо щільність брикетів становить ρ_{br}=3,6…4,9 г/см^3, при цьому коефіцієнт ущільнення $Ку$=1,8…2,3. Зазначені інтервали значень показників ущільнення визначають межі ділянок А і A_1 на номограмі. Межі областей А і А1 визначають граничну допустиму величину зносу, при якій можливе отримання брикетів, що мають необхідні якісні характеристики – щільність і міцність. Так, для розглянутої шихти і обраної конфігурації формуючого елемента допустима величина зносу δ не більше 9,5 мм.

Досягнення необхідних величин ущільнення $Ку$, ρ_{br} шихти на різних стадіях зносу бандажів і збільшення тривалості їх експлуатації можливо за рахунок зміни умов подачі шихти, тобто зміни кута пресування $\alpha_{пр}$. Для дослідження можливості збільшення експлуатаційного періоду бандажів використовується ліва частина номограми.

Тут представлені графічні залежності, що характеризують зміну технологічних $Ку$, ρ_{br} та енергосилових P та M параметрів брикетування при зміні кута пресування α_{pr}. На номограмі наведено зазначені залежності для прийнятих ступенів зносу 0, 1, 2, 3, 4, 5. Використовуючи задані раніше інтервали показників ущільнення ρ_{br}=3,6…4,9 г/см^3, $Ку$=1,8…2,3, визначаються межі областей В и B_1.

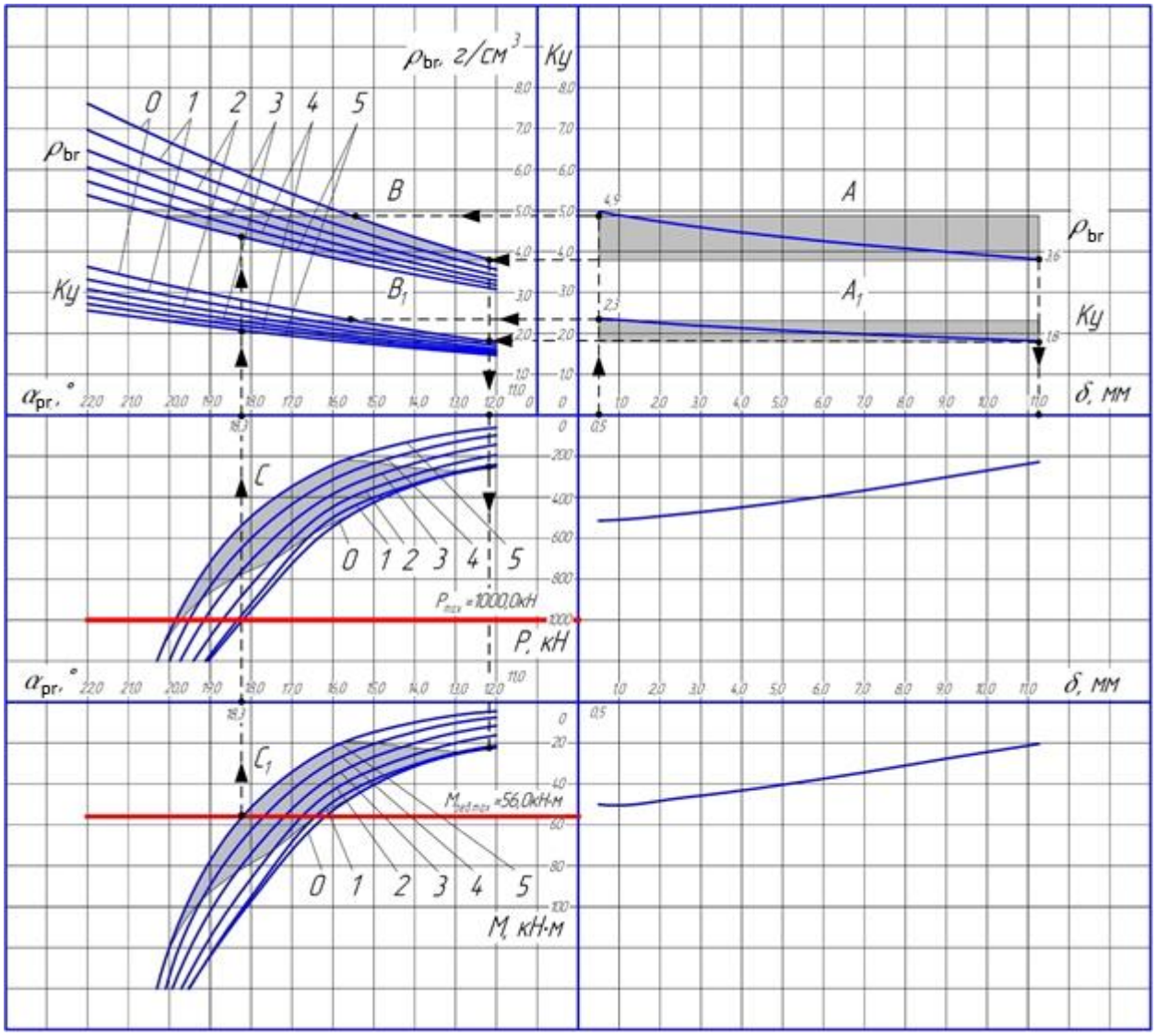


Рисунок 2.22 – Номограма параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F1

Шихта: 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного.

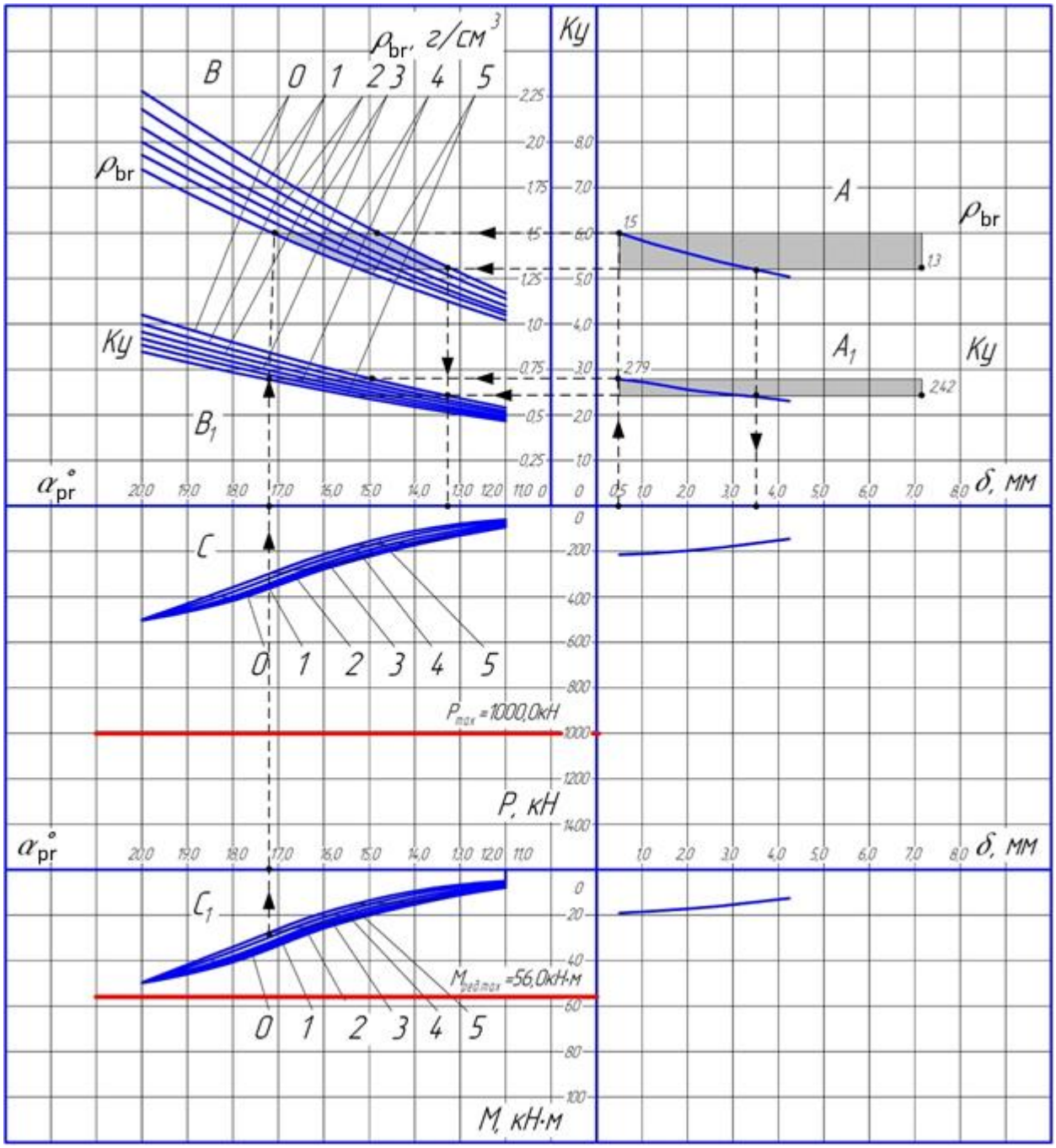


Рисунок 2.23 – Номограма параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F2

Шихта: 85% коксового дріб'язку, 7,5% вапна гашеного і 7,5% меляси (ρ = 1,2г/см^3).

Межі цих областей визначають діапазон регулювання кута пресування для кожного ступеня зносу і його граничні допустимі значення. Так, наприклад, згідно з номограми на рис. 2.21, для незношених контурів кут пресування може змінюватися в інтервалі від 10° до 12,8°, по мірі зносу цей кут змінюється в такий спосіб: ступінь зносу 1 – 11…13,5°, 2 – 11,3…14,5°, 3 – 12…15,2°, 4 – 13…16°; 5 – 13…16,8°. Таким чином, при зростанні зносу від 0-го до 5-го ступеню кут пресування може змінюватися від 10° до 16,8°. Збільшення кута пресування супроводжується зростанням енергосилових параметрів брикетування. Зміна Р і М в зазначеному інтервалі кута пресування визначається межами областей С та C_1. Ці області визначають максимальні значення зусилля пресування і моменту пресування:

незношений контур – P = 480 кН; M = 48 кН×м,

1-й ступінь зносу – P = 580 кН; M = 58 кН×м,

2- й ступінь зносу – P = 630 кН; M = 70 кН×м,

3- й ступінь зносу – P = 750 кН; M = 78 кН×м,

4- й ступінь зносу – P = 800 кН; M = 85 кН×м,

5- й ступінь зносу – P = 880 кН; M = 95 кН×м.

Кут пресування можна збільшувати до досягнення заданих технічних характеристик преса. Преси, використовувані в технологічних лініях виробництва брикетів з розглянутих шихт, мають такі енергосилові характеристики: P_{max}=1000 кН, M_{max}=56 кН×м. Області В та B_1 визначають значення кута пресування, при яких не тільки забезпечується необхідна величина ущільнення шихти, а й дотримуються умови експлуатації преса в межах заданих технічних характеристик.

У розглянутому прикладі регулювання кута пресування в межах зазначених областей лімітується, в першу чергу, величиною $M_{\max}$=56 кН×м. Тому величина кута пресування повинна бути не більше 15,7°.

Для оцінки впливу параметрів робочої поверхні бандажів на величину технологічних і енергосилових характеристик брикетування на різних стадіях зносу використовуємо номограму, побудовану для цієї ж шихти і зубчасто-жолобчастої конфігурації F1 (див. Розділ 2.2.2, табл. 2.3), (рис. 2.22).

При тих же значеннях меж областей А и $А_1$ величина граничного допустимого для експлуатації бандажів зносу збільшується до δ=11,3 мм. Діапазон регулювання кута пресування при зміні зносу від 0-го до 5-го ступеня становить 12…18,3°. Порівняння номограм, представлених на рис. 3.22 і 3.23, показує, що при тих же значеннях технічних характеристик преса застосування для даної шихти формуючий елемент F1 дозволяє збільшити гранично допустиму величину зносу бандажів. За допомогою номограм можна проаналізувати вплив властивостей матеріалу що брикетується на умови експлуатації зношених бандажів. Розглянемо номограмму, побудовану для шихти 85% коксового дріб'язку, 7,5% вапна гашеного і 7,5% меляси (ρ = 1,2 г/см^3), (рис. 2.23). Ця шихта має значні відмінності за фізико-механічними властивостями в порівнянні з попередньою шихтою, про що свідчать дані, наведені в розділі 2.2.1. Досвід виробництва брикетів з даної шихти показує, що їх якісні характеристики відповідають вимогам споживачів при наступних показниках ущільнення – ρ_{br}=1,3…1,5 г/см^3; *Ку*= 2,42…2,79.

Виходячи з областей А та $А_1$, для зазначеної шихти встановлюємо, що величина допустимого для продовження експлуатації бандажа зносу зменшується до δ=3,3 мм. Розглядаючи області В та $В_1$ для тих же заданих значень технічних характеристик, визначається зміна кута пресування – 13,7…17,3°. Таким чином, при зміні опору стисненню шихти зменшується допустима величина зазору між валками, при якому розвивається тиск, необхідний для формування брикетів необхідної щільності і міцності. Збільшення тривалості експлуатації зношених бандажів можливо не тільки за рахунок зміни умов подачі шихти, а й за рахунок зміни технологічних характеристик шихти – вологості, виду і кількості сполучного.

Розглянуті приклади показують, що за допомогою розробленого методу побудови номограм можна визначити значення технологічних і енергосилових характеристик процесу при різному ступеню зносу бандажів з урахуванням фізико-механічних властивостей шихти і конфігурації формуючих елементів. Це дозволить для конкретної шихти вибрати форму пресуючего калібру, що

забезпечує найбільш сприятливий режим роботи для зношених бандажів, як за тривалістю експлуатації, так і по енергосилових характеристик. Номограми дозволяють виконати прогнозну оцінку впливу технологічних характеристик шихти на умови експлуатації бандажів при різному ступеню їх зносу і на її основі вибрати раціональний технологічний режим брикетування.

Розроблений метод побудови номограм буде використаний при створенні експертної системи для оцінки умов і особливостей експлуатації бандажів при різному ступеню зносу, вибору найбільш сприятливого режиму роботи зношених бандажів і розробки рекомендації щодо збільшення їх експлуатаційного ресурсу.

2.3.5. Експериментальні дослідження та порівняльний аналіз результатів розрахунково-аналітичних і експериментальних досліджень впливу зносу бандажів на параметри процесу брикетування

Для порівняльного аналізу результатів розрахунково-аналітичних досліджень з експериментальними використані дані по зносу, отримані на промисловому валковому пресі и на експериментальному валковому пресі ІЧМ.

В якості практичних виробничих даних використані енергосилові і технологічні характеристики брикетування відсівів феросплавів при експлуатації бандажів з різною величиною зносу, отримані в результаті контролю параметрів роботи валкового преса, що працює в складі технологічної лінії брикетування на заводі по виробництву брикетів для металургійної промисловості ООО «Конкрет» (г. Кам’янське).

Валковий прес, для якого отримані експериментальні дані, оснащений бандажами діаметром 648 мм з шириною робочої поверхні 350 мм, з зубчасто-жолобчастою конфігурацією пресуючих калібрів F1, які формують брикети «пельменеподібної» форми розмірами 63,6х60х27 мм та об’ємом 48…50 $см^3$. Частота обертання валків преса становить 3,0 $мин^{-1}$.

У табл. 2.10 наведені значення параметрів процесу брикетування шихти, що складається з 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного, відповідні різній величині зносу бандажів, визначеного в процесі їх експлуатації.

У виробничих умовах мають місце коливання фізико-механічних властивостей шихти, що знаходить відображення в зміні значень насипної щільності і показників ущільнення – ρ_{br} та *Ку*.

Коефіцієнт ущільнення шихти при формуванні брикетів у валковому пресі визначається за формулою [1]:

$$Ky = 1 + \frac{D_0}{H_{br}}(1 - \mathrm{Cos}\,\alpha_{pr}), \qquad (2.22)$$

де D_0 – приведений діаметр валків; H_{br} – середня товщина брикету; α_{pr} – кут пресування.

По мірі зношування бандажів збільшується зазор між валками, збільшується товщина H_{br} брикетів, що при незмінному значенні кута пресування веде до зниження значення *Ку* шихти, а, відповідно, і щільності брикетів ρ_{br}. На практиці для того, щоб значення щільності ρ_{br} та коефіцієнта ущільнення *Ку* шихти з ростом зносу бандажів залишалися в межах, що забезпечують отримання якісних брикетів, збільшується подача шихти в валки шляхом зміни значення кута пресування $\alpha_{пр}$. У розглянутій установці конструктивне виконання завантажувального пристрою передбачає регулювання подачі матеріалу за допомогою зміни положення шиберної заслінки.

Як видно з табл. 2.10, зі збільшенням зносу бандажів для забезпечення необхідних значень ρ_{br} и *Ку* змінювалося становище шиберной заслінки. Положення заслінки визначається за допомогою спеціальної шкали. У таблиці вказані ділення шкали, що характеризують стан заслінки. Відповідні значення кута пресування визначаються за допомогою аналітичного виразу [1]:

$$\alpha_{pr} = Arc\,\mathrm{Cos}[1 - (Ky - 1)\frac{H_{br}}{D_0}], \qquad (2.23)$$

Таблиця 2.10 – Значення параметрів процесу брикетування

«Завод з виробництва брикетів для металургійної промисловості ООО Конкрет», м. Кам'янське
Шихта: 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

№ п/п	Величина зносу бандажів (зазор), мм	Фракція, мм	Насипна щільність шихти, г/см^3	Щільність брикетів, г/см^3	Коефіцієнт ущільнення брикетів	Положення шиберной заслінки завантажу-вального пристрою, ділення шкали	Кут пресування, градуси	Струм електро-двигуна приводу преса, А	Потужність, споживана, кВт
1.	7,0	0-5	1,90	4,2	2,21	5	17,7	35…55	16,8…26,4
2.	8,0	0-5	1,86	4,1	2,20	6	18,0	35…55	16,8…26,4
3.	9,0	0-5	1,95	4,3	2,21	7	18,4	35…55	16,8…26,4
4.	10,0	0-5	1,98	4,2	2,12	7	18,1	35…45	16,8…21,6
5.	10,5	0-5	2,0	4,2	2,10	8	18,1	35…45	16,8…21,6
6.	11,0	0-5	1,95	4,1	2,10	8	18,3	35…40	16,8…19,2
7.	11,5	0-5	2,10	4,0	1,90	9	16,7	20…30	9,6…14,4
8.	12,0	0-5	2,00	3,8	1,90	10	16,9	20…25	9,6…12,0

де $Ky = \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{br}}$.

Для вказаних таблиці 2.10 величин зносу бандажів і характеристик ущільнення шихти визначені значення кута пресування α_{pr}.

Дані табл. 2.10 показують, що в виробничих умовах підприємства ТОВ «Конкрет» з ростом зносу бандажів збільшувалася кількість шихти, яка подається в осередок деформації, що забезпечувало досягнення необхідної величини ущільнення шихти.

Значення кута пресування α_{pr} значною мірою визначає величину енергосилових параметрів брикетування. В процесі експлуатації значення енергосилових параметрів повинні перебувати в межах технічних характеристик преса. Контроль силового навантаження преса здійснювався за величиною струму електродвигуна. Його значення наведено в таблиці 2.10. Знаючи технічні характеристики електродвигуна, можна визначити споживану потужність при різному ступеню зносу бандажів. Валковий прес, що працює в складі технологічної лінії брикетування на ТОВ «Конкрет», оснащений трифазним асинхронним електродвигуном 4А225М8У3 з номінальною потужністю 30 КВт. Потужність, споживана асинхронним електродвигуном, визначається згідно з формулою:

$$P = 1{,}73 \cdot U \cdot I \cdot Cos\varphi \cdot \eta, \qquad (2.24)$$

де U – напруга, що підводиться до електродвигуна;

I – струм електродвигуна;

$Cos\varphi$ – коефіцієнт активної потужності;

η – коефіцієнт корисної дії.

Для зазначеного двигуна за зареєстрованими у виробничих умовах параметрам U=380 В, I=35…55А та його паспортним характеристикам $Cos\varphi$ =0,81, η=0,9, була визначена споживана потужність (табл. 2.7).

У табл. 2.10 експериментальні значення сили струму електродвигуна, а відповідно і потужність приводу, представлені інтервалами. Мінімальна і максимальна

величина струму відповідають нестабільним умовам отримання брикетів. У розрахунках враховувалися середні значення зазначених величин.

Для порівняльного аналізу виробничих даних, наведених у таблиці 2.10, і розрахункових значень технологічних і енергосилових параметрів процесу брикетування, відповідних різному ступеню зносу бандажів, побудована номограма (рис. 2.24). Вона відображає взаємозв'язок між величиною зносу бандажів δ, щільністю брикетів ρ_{br}, коефіцієнтом ущільнення *Ку* і потужністю *N*.

На номограмі точками показані наведені в табл. 2.10 експериментальні значення щільності брикетів, коефіцієнта ущільнення шихти для заданих значень зносу бандажів і кути пресування, які застосовуються на практиці. Відхилення розрахункових і експериментальних значень становить не більше 12%. Зіставлення розрахункових і експериментальних значень показників процесу брикетування було здійснено також для умов експериментального валкового преса ІЧМ.

Експериментальний валковий прес має діаметр валків 500 мм і ширину робочої поверхні 100 мм, з зубчасто-жолобчастою конфігурацією пресуючих калібрів F3 (див. Розділ 2.2, табл. 2.3), які формують брикети «пельменеподібної» форми розмірами 33х30х18 мм і об'ємом 10 ... 11 см^3. Привід преса дозволяє плавно регулювати частоту обертання валків в межах 0,5 ... 3,0 хв$^{-1}$. Для визначення силових параметрів процесу брикетування використовується вимірювач зусилля пресування ІУЛ-100, який являє собою силовимірювальну систему, побудовану на тензорезисторних датчиках стиснення 1810ДСТ-1МН зі стовпчиковими пружними елементами [155]. Система призначена для вимірювання розпірного зусилля (зусилля пресування), що виникає в валковому пресі в процесі брикетування шихти.

Нині знос бандажів експериментального преса становить 3 мм. Для проведення експериментів використовувався каолін марки КВ-1 фракції -5 мм з різною вологістю – W=10% и W=15%. Зміна вологості каоліну дозволяє оцінити вплив зміни технологічних властивостей шихти (вологість, насипна щільність) на енергосилові параметри брикетування.

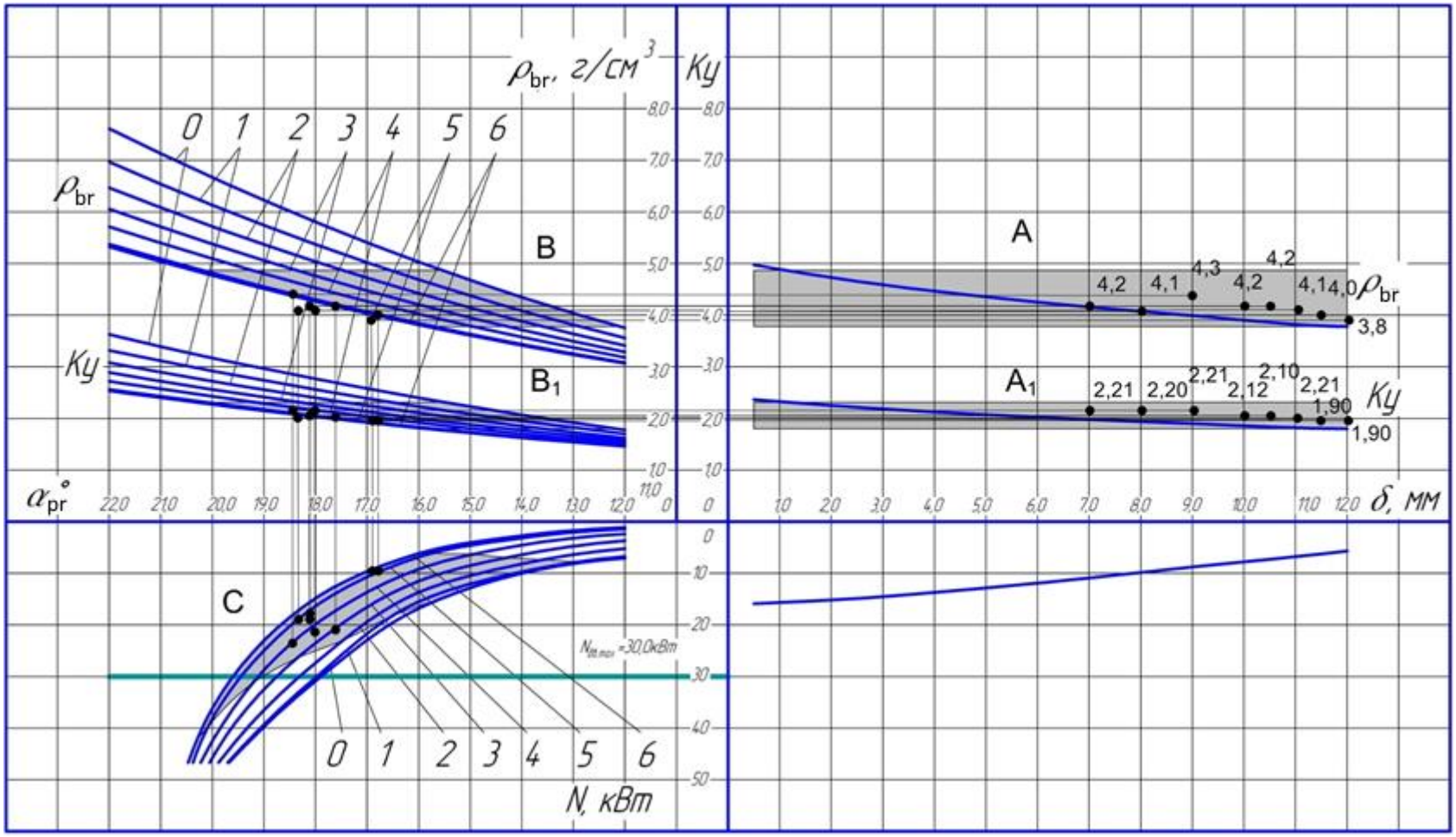


Рисунок 2.24 – Номограма параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів для промислового валкового преса

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F1

Шихта: 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

Таблиця 2.11 – Значення параметрів процесу брикетування

Експериментальний валковий прес ІЧМ; Шихта: Каолін W = 10%

№ п/п	Величина зносу бандажів (зазор), мм	Фракція, мм	Насипна щільність шихти, г/см^3	Щільність брикетів, г/см^3	Коефіцієнт ущільнення шихти	Положення шиберної заслінки завантажувального пристрою, мм	Кут пресування, градуси	Експериментальне значення зусилля пресування, кН	Розрахункове значення зусилля пресування, кН
1.	3	0-5	0,99	1,90	1,93	100	12,1	90…100	85
2.	3	0-5	0,99	2,10	2,13	120	13,4	115…125	115
3.	3	0-5	0,99	2,15	2,18	150	13,7	125…145	125

Таблиця 2.12 - Значення параметрів процесу брикетування

Експериментальний валковий прес ІЧМ; Шихта: Каолін W = 15%

№ п/п	Величина зносу бандажів (зазор), мм	Фракція, мм	Насипна щільність шихти, г/см^3	Щільність брикетів, г/см^3	Коефіцієнт ущільнення шихти	Положення шиберної заслінки завантажувального пристрою, мм	Кут пресування, градуси	Експериментальне значення зусилля пресування, кН	Розрахункове значення зусилля пресування, кН
1.	3	0-5	1,00	1,94	1,93	100	12,1	51…53	60
2.	3	0-5	1,00	2,04	2,03	120	12,7	63…65	70
3.	3	0-5	1,00	2,12	2,12	150	13,3	68…75	80

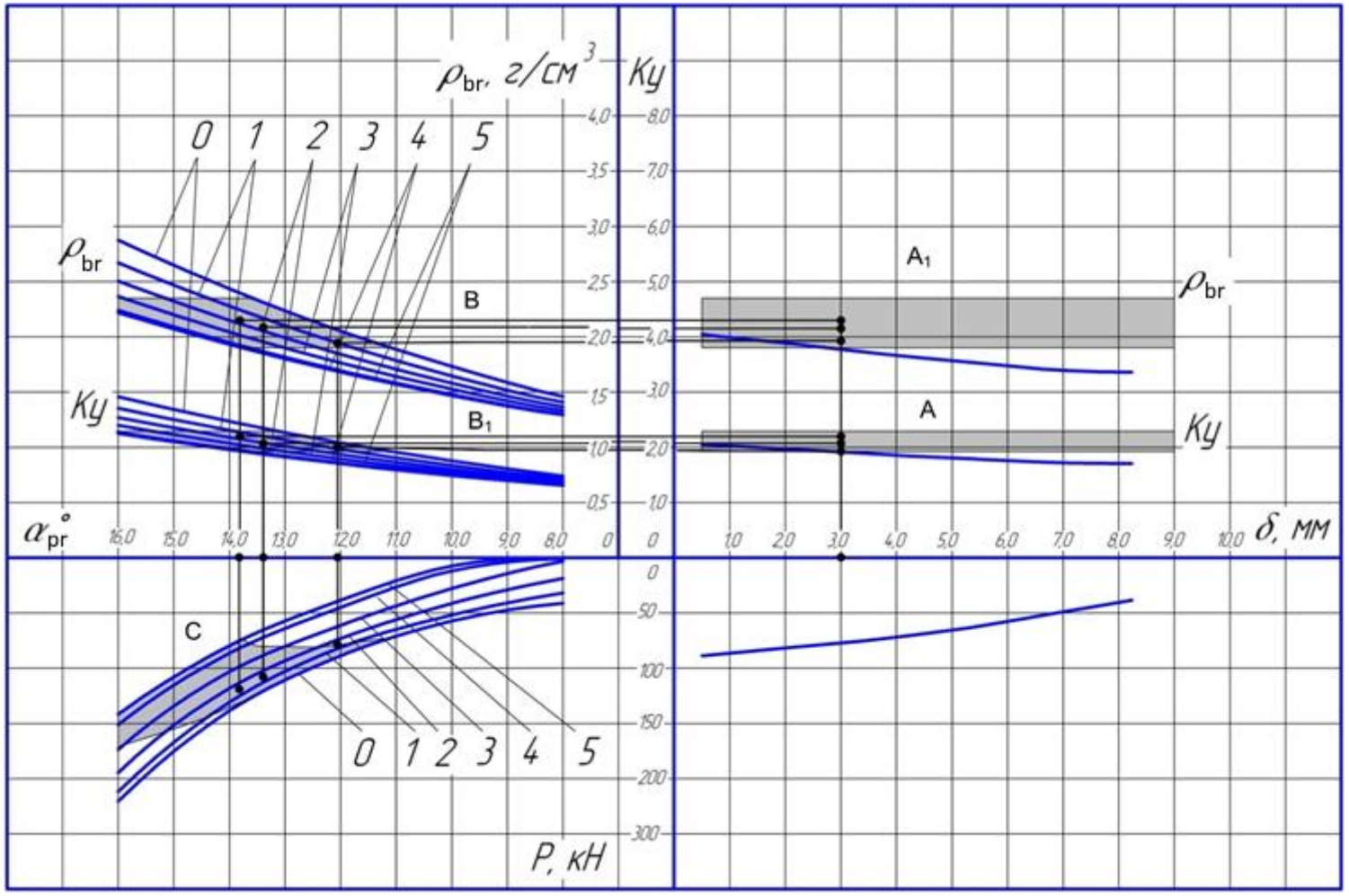


Рисунок 2.25 – Номограма параметрів брикетування для експериментального валкового преса

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F4

Шихта: Каолін W = 10%

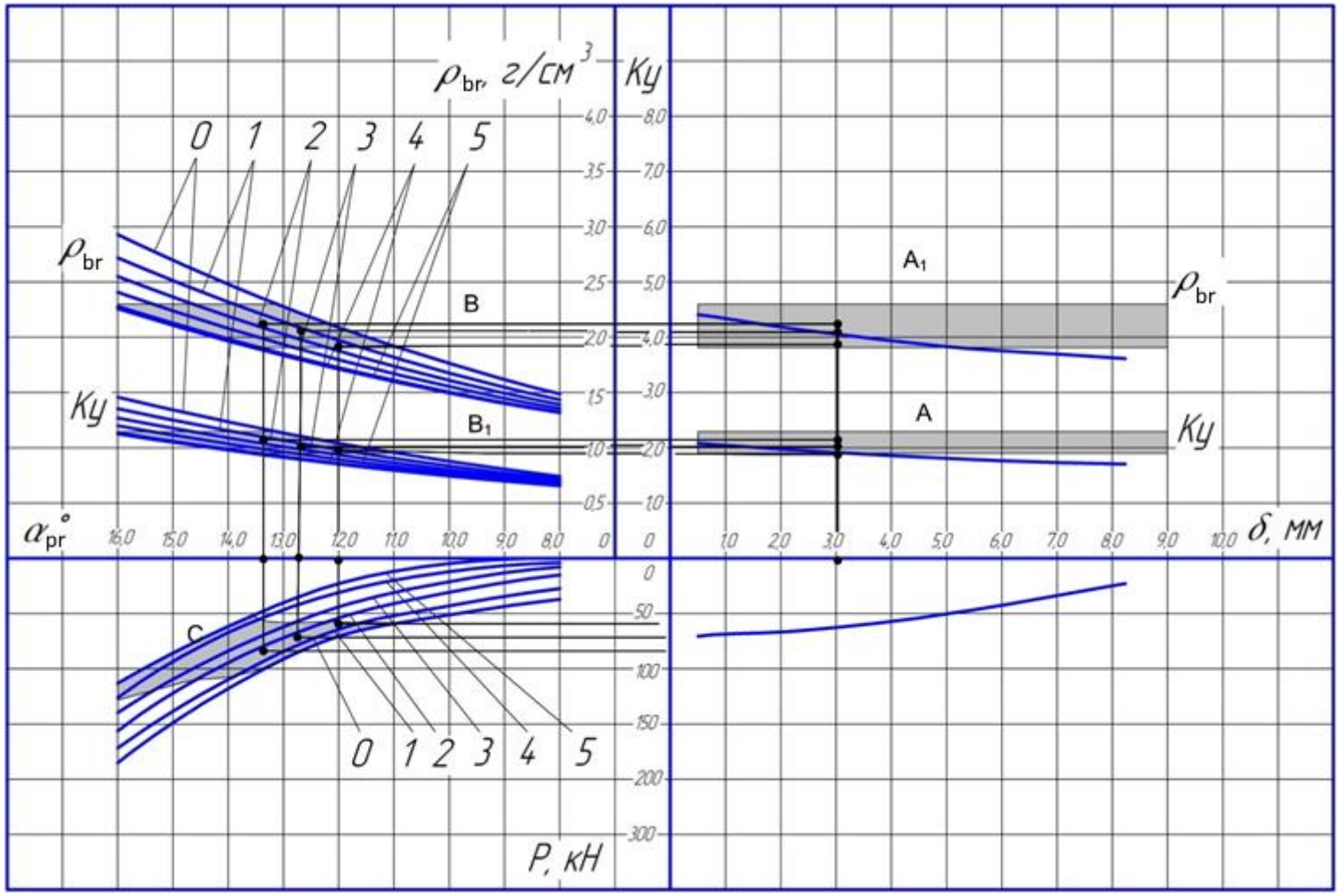


Рисунок 2.26 – Номограма параметрів брикетування для експериментального валкового преса

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F4

Шихта: Каолін W = 15%

В процесі експериментів змінювали положення шиберной заслінки завантажувального пристрою і таким чином встановлювали різну величину подачі матеріалу в осередок деформації. Подача шихти визначається її положенням щодо корпусу завантажувального пристрою.

При проведенні експериментів на валковому пресі ІЧМ вимірювали значення зусилля пресування. Визначали щільність отриманих брикетів і розраховували коефіцієнт ущільнення шихти для відповідного кута пресування.

У табл. 2.11 і 2.12 наведені результати експериментальних досліджень, отриманих в умовах лабораторної бази ІЧМ. Для порівняльного аналізу експериментальних даних з розрахунковими використані номограми, представлені на рис. 2.25 і 2.26. На номограми нанесені точки, відповідні експериментально отриманими значеннями щільності брикетів, коефіцієнта ущільнення шихти і відповідні їм кути пресування і значення зусилля пресування (табл. 2.11, 2.12). Відмінність експериментальних і розрахункових значень енергосилових параметрів брикетування не перевищує 15%. Проведене порівняння експериментальних і розрахункових даних підтверджують коректність створеного в роботі розрахунково-аналітичного методу побудови номограм і можливість його застосування для оцінки умов і особливостей експлуатації бандажів при різному ступеню зносу з урахуванням фізико-механічних властивостей шихти і конфігурації формуючих елементів.

2.4. Розробка системного підходу для аналізу та оптимізації рішень, що забезпечують збільшення ресурсу експлуатації бандажів

2.4.1. Створення структури і алгоритму вибору раціональних режимів роботи бандажів, технологічних і технічних рішень для збільшення тривалості їх експлуатації

В даний час в різних областях науки і техніки використовується системний підхід до організації життєвого циклу систем і агрегатів, який у багатьох

випадках реалізується з використанням технології експертних систем (ЕС). Експертні системи набули значного поширення завдяки якості та ефективності результатів, одержуваних при вирішенні спеціалізованих завдань, складних для традиційного програмування. Експертні системи призначені для вирішення завдань, які відрізняються великою кількістю змінюваних вхідних даних і оцінюваних параметрів, в умовах неповноти, неоднозначності і навіть суперечливості вихідних даних і знань про проблемну область розв'язуваної задачі. Використання експертних систем дозволяє розширити простір рішення, тобто перебір варіантів при пошуку рішення [156]. ЕС доцільно застосовувати і для дослідження умов, що виникають при експлуатації валкових пресів на різних стадіях зносу бандажів. Проблема, досліджувана в даній роботі, вимагає всебічного і комплексного підходу, що дозволяє врахувати велику кількість факторів, що впливають на динаміку і характер зносу робочої поверхні бандажів, а також багатоваріантність умов процесу брикетування. Це пов'язано з різноманіттям матеріалів, що брикетуються, зміною їх властивостей в широкому діапазоні, причому ці властивості неоднозначно впливають як на фрикційну взаємодію шихти і матеріалу бандажа, так і на технологічні і силові характеристики процесу брикетування.

Так, опір шихти стиску залежить від її фізико-механічних властивостей (насипної щільності, гранулометричного складу, вологості і ін.). Зміна кожного з них впливає на механізм і показники ущільнення шихти, величину контактних напружень на кордоні взаємодії бандажа з шихтою, ступінь зносу бандажів, енергосилові характеристики процесу.

Наприклад, збільшення вологості шихти може істотно знизити тиск пресування і зменшити складові сил, що діють на бандаж з боку шихти, але, з іншого боку, при цьому зменшиться щільність і міцність брикетів.

Вплив крупності частинок також має суперечливий характер. Чим більше середній діаметр частинок, тим більше пляма контакту частинки шихти з бандажем. При цьому число таких контактів на робочій поверхні, яка

визначається кутом пресування, скорочується. Гранулометричний склад шихти, таким чином, має неоднозначний вплив на інтенсивність зношування.

Зміну умов подачі шихти в осередок деформації також необхідно враховувати при оцінці роботи преса з різним ступенем зносу бандажів. Збільшення кута подачі шихти в валки дозволяє досягти більш високих значень показників ущільнення, навіть при роботі на зношених бандажах, але при цьому збільшується поверхня взаємодії шихти з бандажами, зростають енергосилові характеристики процесу.

У реальних виробничих процесах має місце нестабільність умов брикетування, як технологічних, так і енергосилових. Це впливає на величину і розподіл складових тиску пресування в осередку деформації, силові характеристики взаємодії пари бандаж-шихта.

З огляду на сказане, вирішені в попередніх розділах роботи завдання наштовхують на думку про необхідність формування системного підходу, структурованого за принципом побудови ЕС, який впорядковує черговість застосування створених в роботі методів оцінки впливу зносу бандажів на енергосилові і технологічні параметри брикетування в валкових пресах. Це дозволить врахувати сукупність відомих чинників та можливі їх зміни при оцінці впливу зносу на технологічні і енергосилові параметри брикетування, вибрати з великої кількості варіантів найбільш сприятливі режими роботи преса на різних стадіях зносу бандажів, щоб забезпечити отримання брикетів необхідної якості.

Для формування структури зазначеного системного підходу використані основні компоненти і методологія розробки ЕС [156]. По суті, мова йде про формування структури прототипу ЕС управління життєвим циклом змінних кільцевих бандажів валкових брикетних пресів.

Структурна схема пропонованого системного підходу представлена на рис. 2.27. Формування цієї структури проводилося відповідно з основними методами системного аналізу – блочно-модульний метод, метод класифікації, метод морфологічного аналізу, структурного аналізу і проектування [157].

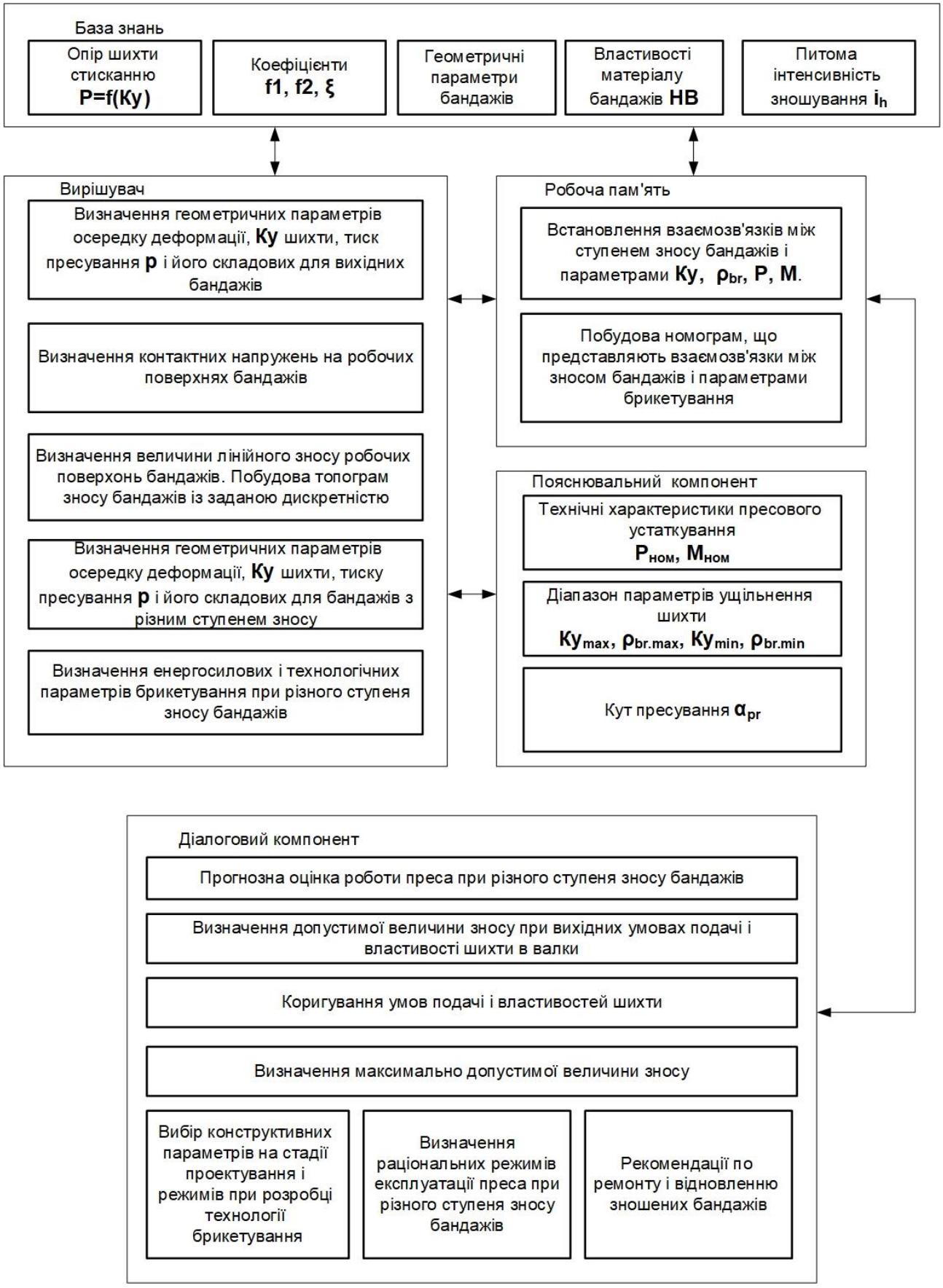


Рисунок 2.27 – Структура системного підходу до аналізу та оптимізації рішень, що забезпечують збільшення ресурсу експлуатації бандажів

Структура системного підходу, яка в подальшому може бути реалізована у вигляді ЕС, сформована з п'яти основних блоків [158].

Перший – база знань. Вона містить дані, що описують досліджувану проблему. Базу знань в системі становлять дані про властивості шихти, характеристики матеріалу бандажів і його конструкції, параметри, що визначають умови взаємодії шихти з робочими поверхнями бандажів в процесі їх зношування. В ході роботи експертної системи дані з бази знань використовуються вирішувачів і робочою пам'яттю.

Другий – вирішувач за допомогою даних з бази знань і бази даних (робоча пам'ять), використовуючи розрахунково-аналітичні методи і моделі, забезпечує вирішення поставленого завдання. Цей блок призначений для проведення розрахунків і отримання масиву даних, що характеризують геометричні параметри робочих поверхонь бандажів з різним ступенем зносу і відповідні їм показники ущільнення шихти і енергосилові характеристики брикетування.

Третій блок – використовує отриманий вирішувачем масив даних для отримання аналітичних і графічних залежностей, що характеризують взаємозв'язки між величиною зносу бандажів і характеристиками процесу брикетування – коефіцієнтом ущільнення шихти, щільністю брикетів, зусиллям і моментом пресування, потужністю приводу преса.

Четвертий блок – формує уявлення отриманих даних у вигляді графіків і аналітичних виразів і дає можливість відобразити всю сукупність взаємозв'язків між аналізованими параметрами експлуатації бандажів у вигляді номограм.

П'ятий блок являє собою пояснювальний компонент, в якому в нашому випадку міститься інформація про умови проведення експертизи: діапазон зміни щільності брикету, який визначається технологічним регламентом, задані характеристики приводу преса. Діалоговий компонент надає користувачеві експертної системи отримані в результаті рішення задачі дані, пропонує варіанти можливих рішень, рекомендації щодо їх застосування. З його допомогою користувач може змінювати умови задачі, уточнювати і коректувати дані з бази даних і бази знань.

На даному етапі досліджень відповідно до структури запропонованого системного підходу і розроблених в роботі методів можливе формування алгоритму їх застосування до вирішення наступних завдань:

- прогнозної оцінки умов роботи пресового обладнання при різному ступеню зносу бандажів;
- визначення раціональних технологічних режимів брикетування при різному ступеню зносу бандажів;
- встановлення максимально допустимого ступеня зносу бандажів для конкретного шихтового матеріалу з урахуванням його властивостей;
- розробки рекомендацій щодо збільшення експлуатаційного ресурсу бандажів (зміна умов подачі матеріалу, коригування властивостей шихти і ін.);
- розробки технічних пропозицій по відновленню зношених бандажів;
- на стадії проектування пресового обладнання – вибір конфігурації і розмірів формуючих елементів, які забезпечують для заданого брикетуємого матеріалу найбільший ресурс експлуатації бандажів.

На рис. 3.28 представлена схема даного алгоритму. Вихідні дані в алгоритмі об'єднані в групи і являють собою базу знань описаного раніше системного підходу. Властивості шихти характеризуються такими параметрами:

- вологість шихти W;
- гранулометричний склад GranS;
- вид сполучного Binder;
- зміст сполучного в шихті B%;
- насипна щільність шихти ρ_{bulk};
- коефіцієнти зовнішнього тертя f_1, внутрішнього тертя f_2, бокового тиску ξ;
- коефіцієнт ущільнення Ky;
- рівняння опору шихти стиску $p = f(Ky)$.

Рішення задач відповідно до алгоритму відбувається наступним чином. Для заданого значення коефіцієнта ущільнення і геометричних параметрів незношеного контуру робочої поверхні бандажів визначається значення кута пресування α_{pr}, що забезпечує необхідну величину ущільнення шихти.

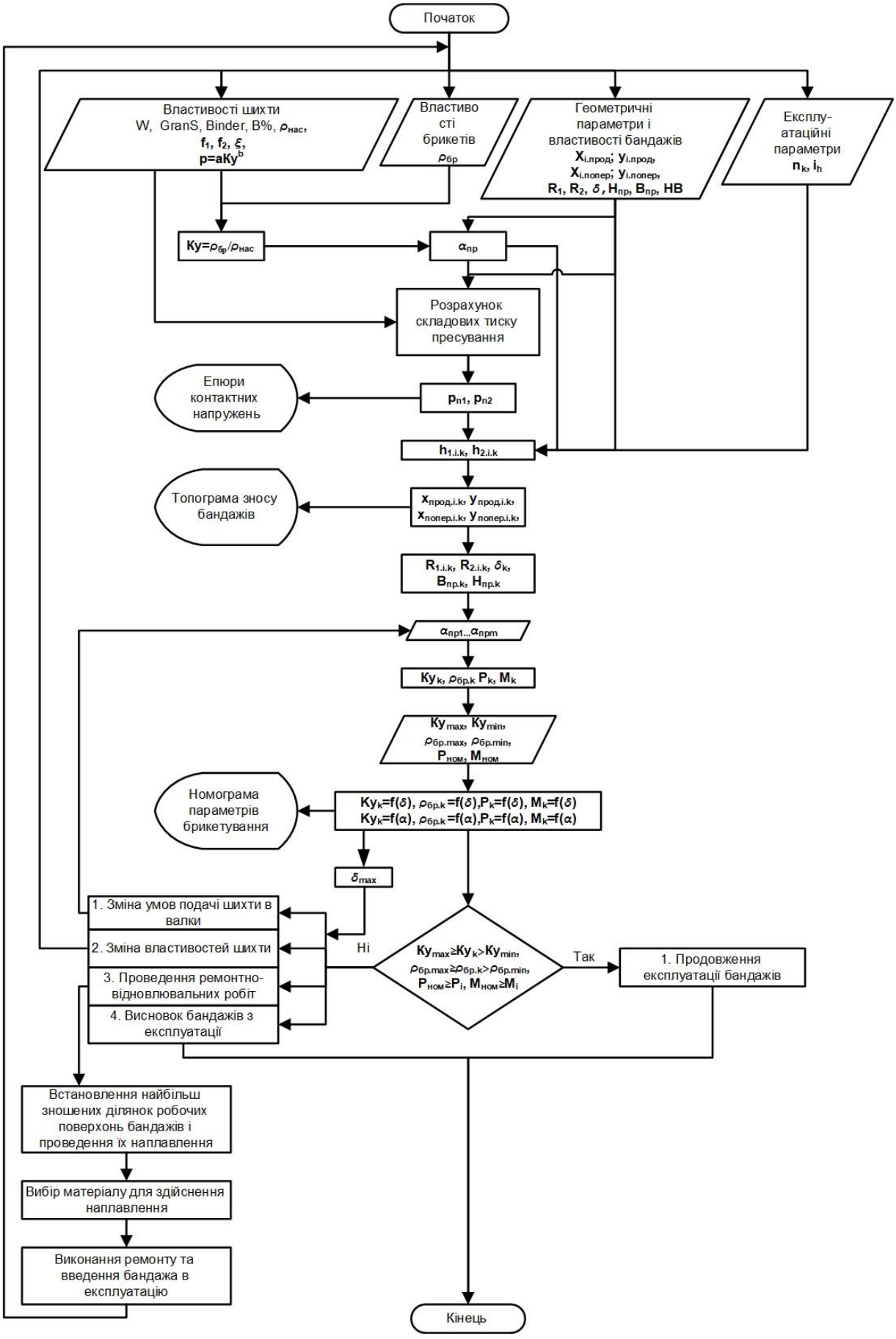


Рисунок 2.28 – Алгоритм застосування системного підходу до аналізу та оптимізації рішень, що забезпечують збільшення ресурсу експлуатації бандажів

Рішення задач відповідно до алгоритму відбувається наступним чином. Для заданого значення коефіцієнта ущільнення і геометричних параметрів незношеного контуру робочої поверхні бандажів визначається значення кута пресування α_{pr}, що забезпечує необхідну величину ущільнення шихти.

Використовуючи залежність $p=f(Ky)$, визначаються тиск пресування і його складові в осередку деформації валкового преса. На підставі отриманих силових характеристик процесу виконується розрахунок значень контактних напружень на робочих поверхнях бандажів. Положення і координати контактних площадок по контуру формуючого елемента визначаються з використанням спеціального програмного модуля.

Алгоритмом передбачено графічне представлення розподілу контактних напружень на робочій поверхні бандажів у вигляді епюр.

Наступною стадією є реалізація створеного в роботі методу побудови топограм зносу. В алгоритмі показана послідовність необхідних для побудови топограм розрахунків, виконуваних з використанням математичної моделі зносу бандажів. Програмна реалізація даної моделі передбачає визначення протяжності ділянки взаємодії шихти з робочою поверхнею бандажа при кожному оберті валків преса (виходячи з кута пресування α_{np}), для заданих періодів експлуатації $n_1 \ldots n_k$ – значень лінійного зносу $h_1 \ldots h_k$, координат контурів робочих поверхонь $x_1 \ldots x_i$; $y_1 \ldots y_i$ бандажів в їх поперечних і поздовжніх перетинах для різного ступеня зносу. Прийняті періоди експлуатації бандажів, виражені в кількості оборотів валків $n_1 \ldots n_k$, задають дискретність обчислень k.

На основі отриманих масивів розрахункових даних виконується побудова топограм зносу бандажів – графічного відображення контурів робочої поверхні бандажів, відповідних різному ступеню їх зносу.

Далі, за допомогою отриманих топограм визначаються технологічні Ky_i, $\rho_{br.i}$ та енергосилові параметри P_k, M_k брикетування на різних стадіях зносу бандажів. Розрахунки виконуються як для вихідного значення кута пресування, так і для можливого діапазону його зміни $\alpha_{pr1} \ldots \alpha_{pr.m}$. Використовуючи отриманий масив даних, будується номограма – графічне відображення взаємозв'язків між величиною

зносу бандажів з технологічними і енергосиловими параметрами брикетування для різних умов подачі матеріалу в валки.

Далі, в структурі алгоритму представлена експертно-аналітична частина, що включає діалоговий і пояснювальний блоки. Отримана номограма використовується в діалоговому блоці для виконання прогнозних і експертних оцінок відповідно до зазначених раніше завдань. Для роботи на цьому етапі в пояснювальному блоці задані умови порівняльного аналізу, на базі яких формується сукупність оціночних показників.

Необхідною умовою вирішення завдань відповідно до алгоритму є знання допустимих меж зміни щільності брикетів і відповідних їм значень коефіцієнтів ущільнення. Як правило, ці показники визначаються технологічним регламентом або технічними умовами на виробництво брикетів:

$$\rho_{br.\max} \geq \rho_{br.k} \geq \rho_{br.\min}\,,\ Ky_{\max} \geq Ky_k \geq Ky_{\min}\,. \qquad (2.25)$$

За допомогою умови (3.25) на номограмі встановлюється область прогнозних оцінок. В межах цієї області експерт може визначити значення технологічних і енергосилових характеристик процесу брикетування для різного ступеня зносу бандажів, а також граничну величину допустимого зносу.

Умова (2.25) використовується також для визначення діапазону зміни кута пресування. Зміна умов подачі матеріалу в валки дозволяє збільшити тривалість експлуатації зношених бандажів. За допомогою умови (3.25) можна встановити область, в межах якої можливе збільшення кута пресування α_{pr}. Для визначення меж регулювання подачі матеріалу в валки необхідно розглянути силові характеристики процесу. Якщо в результаті порівняльного аналізу в межах номограми виконуються умови (2.25), то система переходить до виконання наступної умови з пояснювального блоку:

$$P_k \leq P_{nom},\ M_k \leq M_{nom}, \qquad (2.26)$$

Тобто, поточне значення зусилля P_k та моменту M_k пресування не повинні перевищувати значення, задані в технічній характеристиці преса. Якщо дана умова виконується, то експертна система робить висновок про можливість подальшої експлуатації бандажів. При $P_k = P_{nom}$, $M_k = M_{nom}$ визначається гранично допустиме значення кута пресування. Якщо при аналізі номограми виявляється, що в її межах один або обидва параметри P_k та M_k перевищують свої максимальні значення, то система інтерпретує це як порушення стабільного режиму експлуатації бандажів і пропонує ряд рішень цієї проблеми.

На підставі отриманих прогнозних оцінок для кожної величини зносу визначається режим експлуатації преса: величина кута пресування α_{pr}, значення розпірного зусилля P_k, та моменту пресування M_k, а також граничні значення зносу робочої поверхні бандажів (зазор між валками δ_k та кут пресування α_{pr}, при досягненні яких приймається рішення про виведення бандажів з експлуатації.

Одним із завдань, що вирішується за допомогою пропонованого системного підходу, є коригування технологічного режиму отримання брикетів із заданого матеріалу, тобто зміна властивостей шихти з метою досягнення необхідних технологічних показників на різних стадіях зносу бандажів. Можливо кілька варіантів вирішення цього завдання. Досягнення необхідної величини ущільнення шихти в значній мірі залежить від її опору стисненню, описуваного рівнянням $p = a \cdot Ky^b$. Коригування властивостей шихти виконується таким чином, щоб зменшити силові характеристики процесу брикетування за рахунок зміни її опору стисненню, що дозволить збільшити межі регулювання подачі шихти в валки і розширити діапазон експлуатації бандажів. Зміну опору шихти стиску можна досягти шляхом зміни таких параметрів, як вологість шихти W, гранулометричний склад GranS, вид сполучного Binder і його відсотковий B% вміст в шихті.

Наступним завданням, розв'язуваним відповідно до алгоритму, є визначення способу та обсягу ремонтно-відновлювальних робіт. Для відновлення вихідного контуру робочої поверхні бандажів використовуються топограми зносу. Ремонтно-

відновлювальні роботи складаються з наплавленні зношених ділянок бандажів і подальшій механічній обробці наплавленого шару металу з метою забезпечення вихідних геометричних параметрів робочих поверхонь бандажів. Встановлюється розподіл зносу по контуру формуючого елемента, виділяються локальні зони найбільшого зносу, визначається товщина наплавленого шару на різних ділянках робочої поверхні бандажів.

На кожній стадії вирішення завдань відповідно до алгоритму експерт оцінює доцільність застосування описаних вище способів збільшення ресурсу експлуатації бандажів або приймає рішення про виведення зношених бандажів з експлуатації. Наприклад, зміна виду сполучного може зажадати значних змін в технологічній лінії. Умови можливості виконання ремонтно-відновлювальних робіт бандажів також залежать від ряду факторів. Це наявність технічних можливостей підприємства, технічний стан бандажа, особливо в тому варіанті, якщо раніше він вже піддавався ремонту шляхом наплавлення. Особливо ефективним є застосування запропонованого алгоритму на стадії проектування пресового обладнання та вибору технологічних режимів брикетування. Реалізований у вигляді програмного комплексу запропонований алгоритм дозволяє оцінити вплив великої кількості факторів на умови експлуатації бандажів і їх знос, оптимізувати вибір конструктивних параметрів преса і характеристик матеріалу, що брикетується

2.4.2. Випробування системного підходу при вирішенні завдань з прогнозування і збільшення ресурсу експлуатації бандажів

Застосування запропонованого системного підходу до вирішення задач з прогнозування і збільшення ресурсу експлуатації бандажів може бути показано на ряді практичних прикладів.

Приклад 1.

Комплект бандажів з формуючими елементами F2 та умови брикетування шихти, що складається з 96,5% силікомарганцю (фр. -6 мм) та 3,5% органічного сполучного.

Відповідно до структури системного підходу формується база знань.

Властивості шихти:

- вологість шихти W=3…4%;
- гранулометричний склад GranS – фр. -6 мм;
- тип сполучного Binder – органічне сполучне;
- вміст сполучного в шихті B%=3,5%;
- насипна щільність шихти ρ_{bulk}=2,10 г/см^3;
- коефіцієнти зовнішнього f_1=0,23, внутрішнього f_2=0,28, тертя і бічного тиску ξ=0,67;
- коефіцієнт ущільнення Ky=2,28;
- рівняння, що описує опір шихти стисненню $p = a \cdot Ky^b$, де a=0,00562, b=11,9.

Властивості брикетів:

Щільність брикетів ρ_{br}=4,9 г/см^3.

Геометричні параметри та властивості бандажів:

Таблиця 2.13 – Координати формуючого елемента в поперечному перерізі бандажа для вихідного контуру

$x_{p.i}$, мм	-19,56	-17,04	-13,29	-9,38	-5,59	-1,86	1,86	5,59	9,38	13,29	17,04	19,56
$y_{p.i}$, мм	0,00	4,14	10,05	13,62	15,50	16,34	16,34	15,5	13,62	10,05	4,14	0,00

Таблиця 2.14 – Координати формуючого елемента в поздовжньому перетині бандажа для вихідного контуру

$x_{pr.i}$,, мм	0	3,70	7,42	11,10	14,78	17,78	18,70	21,38	25,90	29,60	33,3	37,00
$y_{pr.i}$, мм	0	0,41	1,70	4,12	8,60	17,00	20,00	27,89	33,53	35,86	37,10	37,50

Міжосьова відстань валків преса L_M =648 мм;

Радіуси бандажів R_1=342,5 мм; R_2=305,0 мм;

Величина зазору між валками δ=0,5 мм;

Величина твердості робочих поверхонь бандажів по Брінеллю HB=6540 МПа.

Експлуатаційні параметри:

Питома інтенсивність зношування i_h=6,642×10^{-5}

Дискретність обчислень k=1…5. Періоди експлуатації, що задають ступеня зносу бандажів 1 – n_1 =20000 об., 2 – n_2=40000 об., 3 – n_3=60000 об., 4 – n_4=80000 об., 5 – n_5=100000 об.

Виконується заміна поздовжнього і поперечного перетинів формуючого елемента еквівалентними за площею прямокутниками і визначається його наведена висота $H_{pr.k}$ та ширина $B_{pr.k}$:

$$H_{pr.k} = \frac{S_{p.\mathrm{k}}}{L_k}, \tag{2.27}$$

$$B_{pr.k} = \frac{S_{pr.\mathrm{k}}}{B_k}, \tag{2.28}$$

де $S_{p.k}$, $S_{pr.k}$ – площа формуючого елемента в поздовжньому і поперечному перетині; L_k, B_k – відповідно довжина і ширина формуючого елемента.

$S_{p.k}$, $S_{pr.k}$, L_k, B_k визначаються шляхом побудови контуру робочої поверхні бандажа. Використовуючи вирази (2.27), (2.28), визначені H_p= 12,00 мм та B_p=27,65 мм для вихідного контуру формуючого елемента.

Для заданого коефіцієнта ущільнення Ky=2,28 визначається кут пресування:

$$\alpha_{pr} = ArcCos(1 - \frac{(Ky - 1) \cdot H_{br}}{D_0}), \tag{2.29}$$

де H_{br} – товщина брикету;

$$H_{br} = H_p + \delta, \tag{2.30}$$

D_0 – приведений діаметр валків преса.

$$D_0 = L_M - H_{br}, \tag{2.31}$$

Для заданих і отриманих розрахунковим шляхом геометричних параметрів осередку деформації та α_{pr} визначаються нормальні контактні напруги на

робочих поверхнях осередку і жолоби в поперечному і поздовжньому перетинах p_{n1}, p_{n2}, p_{1p}, p_{2p}. Для визначення цих величин використаний розрахунково-аналітичний аппарат, створений в роботі [87].

Далі побудовані епюри контактних напружень на робочих поверхнях бандажів (рис. 2.29). Відповідно до прийнятої моделі величина лінійного зносу поверхонь бандажів:

$$h_{i.\mathrm{k}} = i_h \frac{p_{n.i}}{HB} \cdot \frac{\pi R_i \alpha_{pr}}{180^\circ} n_k, \qquad (2.32)$$

де $p_{n.i}$ – величина нормального контактного напруження; $\frac{\pi R_i \alpha_{pr}}{180^\circ}$ – протяжність ділянки взаємодії шихти, що брикетується, з робочою поверхнею бандажа при кожному оберті валків преса; n_k – кількість обертів валка за період експлуатації; Ri – радіус, який визначає положення контактної площадки щодо осі валка:

в поперечному перетині

$$R_i = R_1 - y_{p.\mathrm{i}}, \qquad (2.33)$$

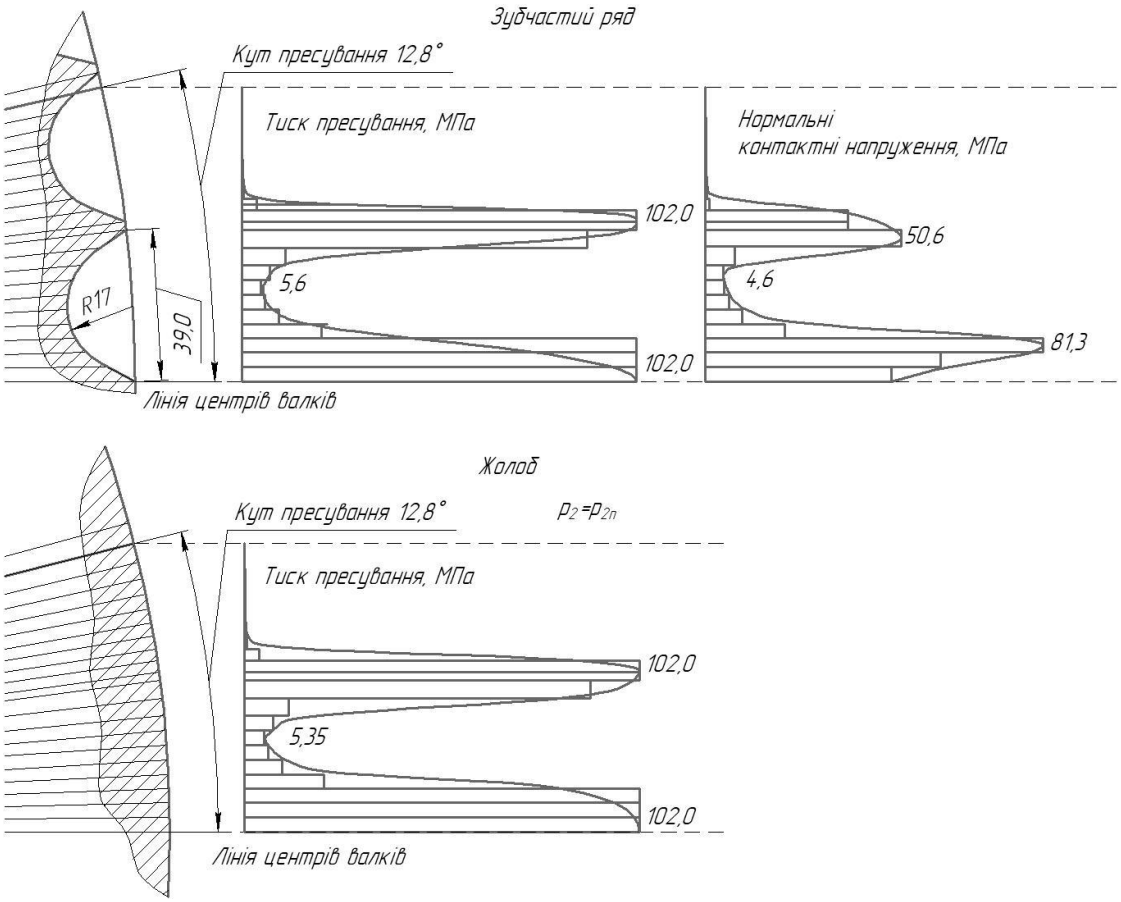
в поздовжньому перетині

$$R_i = R_1 - y_{pr.\mathrm{i}}, \qquad (2.34)$$

Результатом обчислень лінійного зносу в поперечному і поздовжньому перетинах бандажів є масив даних (табл. 215).

На підставі масиву даних табл. 2.15 були побудовані топограми зносу, та за їх допомогою визначені координати контуру формуючого елемента в поздовжньому і поперечному перетині для різного ступеня зносу (табл. 2.16, 2.17).

а.



б.

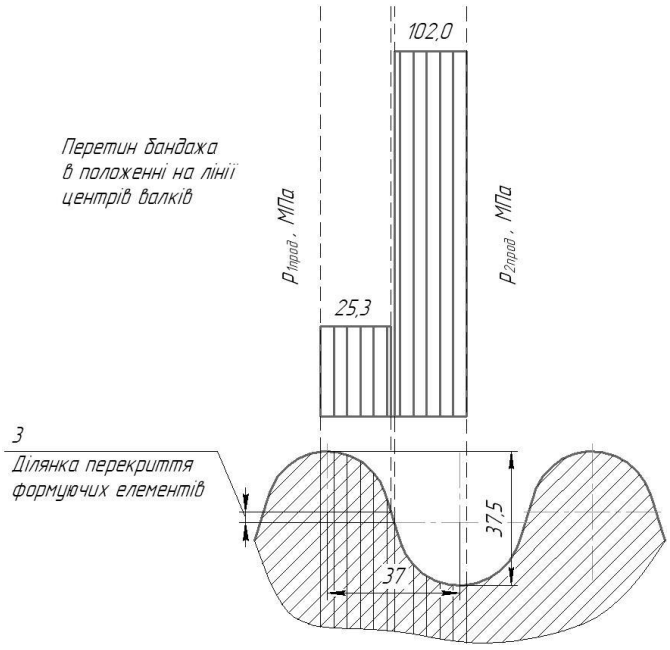


Рисунок 2.29 – Епюри контактних напружень для бандажа з зубчасто-жолобчастими формуючими елементами F2; шихта - 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

а – повздовжній перетин; б – поперечний перетин

Таблиця 2.15 – Лінійний знос бандажів

Ступінь зносу k	Період експлуатації n_k, об.	Лінійний $h_{p.i.k}$, $h_{pr.i.k}$ знос бандажів в поперечному і поздовжньому перетинах												
1	20000	$h_{p.i}$	0,756	0,734	0,801	0,741	0,397	0,160	0,096	0,079	0,091	0,202	0,0603	0,756
		$h_{pr.i}$	0,393	0,392	0,390	0,388	0,383	0,373	1,493	1,457	1,431	1,420	1,414	1,412
2	40000	$h_{p.i}$	1,511	1,468	1,601	1,482	0,794	0,319	0,192	0,157	0,182	0,404	1,207	1,511
		$h_{pr.i}$	0,786	0,785	0,782	0,776	0,766	0,747	2,987	2,913	2,861	2,840	2,828	2,824
3	60000	$h_{p.i}$	2,267	2,202	2,402	2,223	1,192	0,479	0,288	0,236	0,273	0,606	1,810	2,267
		$h_{pr.i}$	1,178	1,177	1,173	1,164	1,149	1,120	4,480	4,370	4,,292	4,259	4,242	4,236
4	80000	$h_{p.i}$	3,022	2,936	3,203	2,964	1,589	0,639	0,384	0,314	0,364	0,808	2,414	3,022
		$h_{pr.i}$	1,571	1,569	1,563	1,552	1,532	1,493	5,973	5,827	5,722	5,679	5,656	5.649
5	100000	$h_{p.i}$	3,778	3,670	4,003	3,705	1,986	0,798	0,480	0,393	0,455	1,010	3,017	3,778
		$h_{pr.i}$	1,964	1,962	1,954	1,940	1,915	1,866	7,466	7,284	7,153	7,099	7,070	7,061

Таблиця 2.16 – Координати формуючого елемента у поперечному перетині

Ступінь зносу k	Період експлу-атації n_k, об.	Координати $x_{p.i.k}$, $y_{p.i.k}$ формуючого елемента поперечному перетині											
0	0	$x_{p.i.k}$	-19,560	-17,040	-13,290	-9,380	-5,590	-1,860	1,860	5,590	9,380	13,290	17,040	19,560
		$y_{p.i.k}$	0,000	4,140	10,050	13,620	15,500	16,340	16,340	15,500	13,620	10,050	4,140	0,000
1	20000	$x_{p.i.k}$	-20,206	-17,667	-13,916	-9,789	-5,721	-1,877	1,87	5,616	9,43	13,448	17,555	20,206
		$y_{p.i.k}$	0,000	4,129	10,078	13,608	15,162	15,748	15,684	14,861	13,066	9,705	4,061	0,000
2	40000	$x_{p.i.k}$	-20,851	-18,294	-14,542	-10,198	-5,851	-1,895	1,881	5,642	9,480	13,606	18,071	20,851
		$y_{p.i.k}$	0,000	4,117	10,106	13,596	14,823	15,155	15,029	14,223	12,511	9,359	3,982	0,000
3	60000	$x_{p.i.k}$	-21,497	-18,921	-15,167	-10,607	-5,982	-1,912	1,891	5,668	9,531	13,764	18,586	21,497
		$y_{p.i.k}$	0,000	4,106	10,134	13,584	14,485	14,563	14,373	13,584	11,957	9,014	3,903	0,000
4	80000	$x_{p.i.k}$	-22,142	-19,548	-15,793	-11,016	-6,113	-1,930	1,902	5,694	9,581	13,922	19,102	22,142
		$y_{p.i.k}$	0,000	4,095	10,162	13,571	14,146	13,970	13,718	12,945	11,403	8,669	3,824	0,000
5	100000	$x_{p.i.k}$	-22,788	-20,175	-16,419	-11,424	-6,243	-1,947	1,912	5,720	9,631	14,080	19,617	22,788
		$y_{p.i.k}$	0,000	4,084	10,190	13,559	13,808	13,378	13,062	12,306	10,848	8,324	3,744	0,000

Таблиця 2.17 – Координати формуючого елемента у поздовжньому перетині

Ступінь зносу k	Період експлу-атації n_k, об.	Координати $x_{pr.i.k}$, $y_{pr.i.k}$ формуючого елемента поздовжньому перетині												
0	0	$x_{pr.i.k}$	0,000	3,700	7,42	11,100	14,780	17,780	18,700	21,380	25,900	29,600	33,300	37,000
		$y_{pr.i.k}$	0,000	0,410	1,700	4,120	8,600	17,000	20,000	27,890	33,530	35,860	37,100	37,500
1	20000	$x_{pr.i.k}$	0,000	3,700	7,420	11,100	14,780	17,780	18,700	21,380	25,900	29,600	33,300	37,000
		$y_{pr.i.k}$	0,393	0,802	2,091	4,508	8,983	17,373	21,493	29,347	34,961	37,280	38,514	38,912
2	40000	$x_{pr.i.k}$	0,000	3,700	7,420	11,100	14,780	17,780	18,700	21,380	25,900	29,600	33,300	37,000
		$y_{pr.i.k}$	0,786	1,195	2,482	4,896	9,366	17,747	22,987	30,803	36,391	38,700	39,928	40,324
3	60000	$x_{pr.i.k}$	0,000	3,700	7,420	11,100	14,780	17,780	18,700	21,380	25,900	29,600	33,300	37,000
		$y_{pr.i.k}$	1,178	1,587	2,873	5,284	9,749	18,120	24,480	32,260	37,822	40,119	41,342	41,737
4	80000	$x_{pr.i.k}$	0,000	3,700	7,420	11,100	14,780	17,780	18,700	21,380	25,900	29,600	33,300	37,000
		$y_{pr.i.k}$	1,571	1,979	3,263	5,672	10,132	18,493	25,973	33,717	39,252	41,539	42,756	43,149
5	100000	$x_{pr.i.k}$	0,000	3,700	7,420	11,100	14,780	17,780	18,700	21,380	25,900	29,600	33,300	37,000
		$y_{pr.i.k}$	1,964	2,372	3,654	6,060	10,515	18,867	27,466	35,174	40,683	42,959	44,170	44,561

З використанням даних топограм визначені геометричні параметри бандажів для різного ступеня їх зносу, представлені в табл. 2.18.

Таблиця 2.18 – Показники зносу

Ступінь зносу k	Період експлуатації n_k, об.	$h_{1.i.k}$, мм	$h_{2.i.k}$, мм	$R_{1.i.k}$, мм	$R_{2.i.k}$, мм	δ_k, мм	$B_{pr.k}$, мм	$H_{pr.k}$, мм
0	0	0	0	342,50	305,00	0,50	27,65	12,00
1	20000	0,39	1,41	342,11	303,59	2,30	28,48	13,67
2	40000	0,79	2,82	341,71	302,18	4,11	29,22	15,34
3	60000	1,18	4,24	341,32	300,76	5,92	29,81	17,00
4	80000	1,57	5,65	340,93	299,35	7,72	30,36	18,73
5	100000	1,96	7,06	340,54	297,94	9,52	30,81	20,36

Далі, використовуючи розрахунково-аналітичний апарат, представлений в роботі [70,80] та дані табл. 2.16, 2.17, визначаються параметри ущільнення Ky_k, $\rho_{br.k}$ і енергосилові P_k, M_k параметри процесу брикетування для різного ступеня зносу бандажів.

Спочатку формується масив даних для вихідного кута пресування α_{pr}=12,8° (табл. 2.19).

Таблиця 2.19 – Параметри брикетування на різних стадіях зносу

Ступінь зносу k	Період експлуатації n_k, об.	δ_k, мм	Параметри ущільнення		Енергосилові параметри	
			Ky_k	$\rho_{br.k}$, г/см^3	P_k, кН	M_k, кН·м
0	0	0,50	2,32	4,87	484,0	46,7
1	20000	2,30	2,16	4,53	432,0	42,1
2	40000	4,11	2,03	4,25	322,9	31,4
3	60000	5,92	1,92	4,04	253,4	24,3
4	80000	7,72	1,84	3,86	202,8	19,2
5	100000	9,52	1,77	3,71	164,4	15,4

Для визначення технологічних і енергосилових параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів і при різних умовах подачі шихти в валки задається дискретний діапазон зміни кута пресування $\alpha_{pr.1}\ldots\alpha_{pr.m}$. У наведеному прикладі цей діапазон заданий наступними значеннями: $\alpha_{pr.1}$ =8°; $\alpha_{pr.2}$ =10°; $\alpha_{pr.3}$=12°; $\alpha_{pr.4}$=14°; $\alpha_{pr.5}$=16°;$\alpha_{pr.6}$ =18°.

На основі цих обчислень сформований масив даних, представлений в табл. 2.20.

Таблиця 2.20 – Параметри брикетування на різних стадіях зносу і кутах пресування

Ступінь зносу k	Період експлуатації n_k, об.	δ_k, мм	α_{pr} град.	Параметри ущільнення		Енергосилові параметри	
				Ky_k	$\rho_{br.k}$, г/см^3	P_k, кН	M_k, кН·м
0	0	0,50	8	1,52	3,18	118,8	10,6
			10	1,81	3,79	182,8	16,7
			12	2,16	4,53	372,8	35,2
			14	2,58	5,41	689,7	69,7
			16	3,05	6,41	1151,6	126,5
			18	3,60	7,55	1315,6	145,7
1	20000	2,31	8	1,45	3,05	95,4	8,5
			10	1,71	3,58	158,7	14,5
			12	2,02	4,23	306,3	29,3
			14	2,38	5,00	661,6	67,8
			16	2,80	5,88	1169,6	130,2
			18	3,27	6,87	1340,5	150,2
2	40000	4,11	8	1,40	2,94	66,1	5,8
			10	1,63	3,42	129,3	11,7
			12	1,90	3,99	237,4	22,5
			14	2,23	4,67	555,4	56,1
			16	2,60	5,46	1104,6	121,3
			18	3,02	6,34	1368,7	152,5
3	60000	5,92	8	1,36	2,86	28,5	2,5
			10	1,56	3,29	99,2	8,9
			12	1,81	3,80	193,5	18,1
			14	2,10	4,42	419,7	41,9
			16	2,44	5,12	991,6	107,1
			18	2,82	5,92	1393,6	154,3
4	80000	7,72	8	1,33	2,79	7,6	0,7
			10	1,51	3,17	67,9	6,1
			12	1,73	3,64	147,1	13,5
			14	2,00	4,20	301,3	29,7
			16	2,30	4,83	774,8	83,7
			18	2,64	5,55	1409,2	162,1
5	100000	9,52	8	1,30	2,73	3,4	0,3
			10	1,47	3,08	28,3	2,6
			12	1,67	3,52	119,5	11,0
			14	1,92	4,02	255,4	25,0
			16	2,20	4,61	599,2	63,9
			18	2,51	5,27	1339,6	154,1

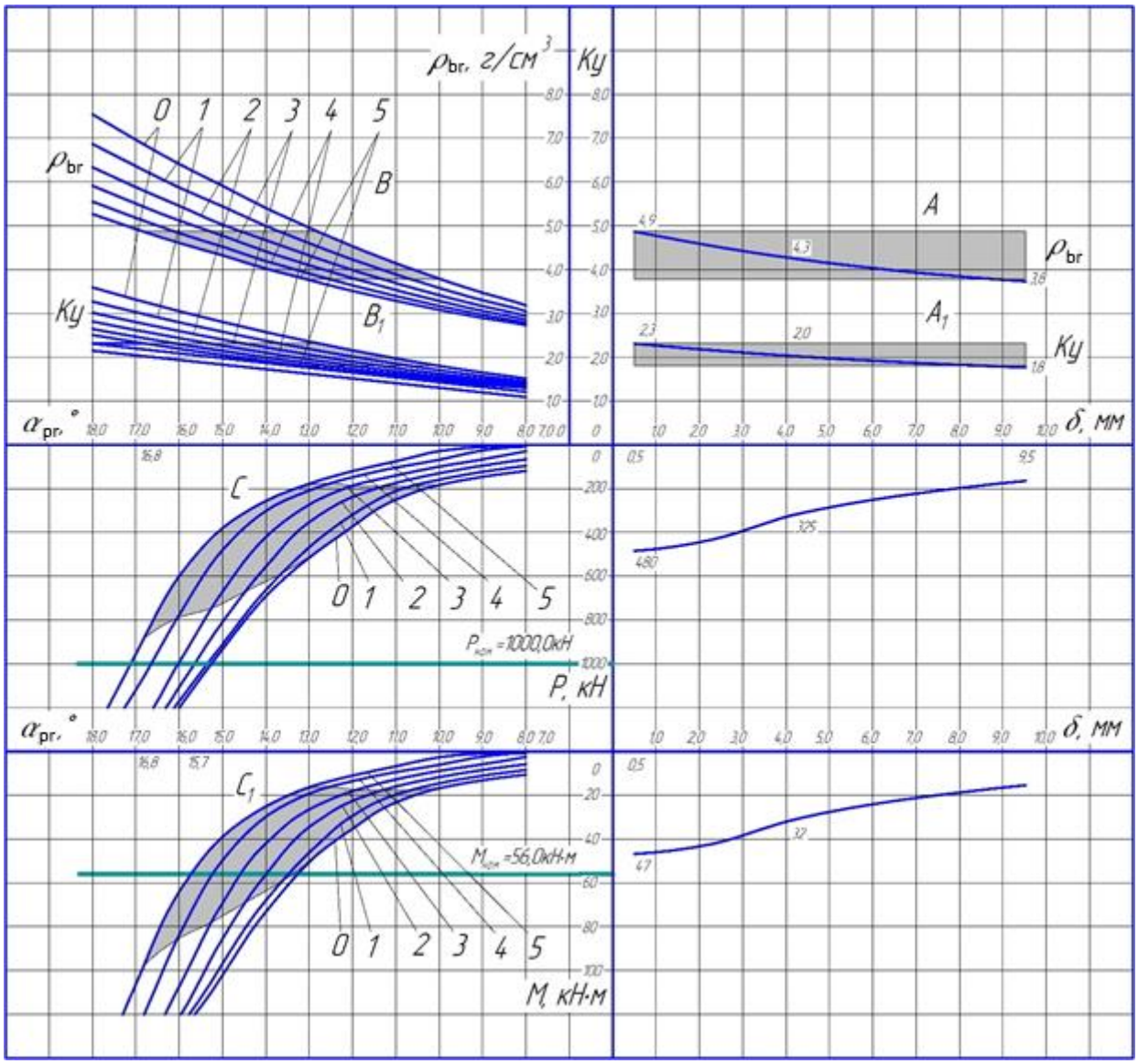


Рисунок 2.30 – Номограма параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F2

Шихта: 96,5% силікомарганцю і 3,5% органічного сполучного

На підставі масивів даних табл. 2.19, 2.20 побудована номограма, представлена на рис. 2.30.

З використанням номограми система вирішує ряд зазначених раніше завдань.

Права частина номограми (рис. 2.30) є графічним відображенням взаємозв'язків між величиною зносу бандажів і параметрами брикетування для вихідного режиму брикетування.

Ця частина номограми дозволяє виконати прогнозну оцінку параметрів ущільнення і технологічних і енергосилових параметрів брикетування для певної міри зносу.

Так, в розглянутому прикладі при зносі, що визначається зазором δ_k =4 мм, Ky_k=2,0; $\rho_{br.k}$ =4,3 г/см^3; P_k=325 кН; M_k=32 кН·м. Далі визначається максимально допустима величина зносу δmax бандажів, при якій досягаються задані технологічні параметри – щільність брикетів $\rho_{br.k}$ та коефіцієнт ущільнення шихти Ky_k. Для цього вводяться умови, що показують допустимі межі зміни зазначених параметрів – 2,3≥Ky_k≥1,8; 4,9 г/см^3≥ρbr.k≥3,8г/см^3. Ці умови визначають границі ділянок А и A_1 на номограмі. З їх урахуванням визначається максимально допустима величина зносу бандажів δ_{max}=8,5 мм.

З використанням запропонованого в роботі аналітичного апарату і системного підходу можливо розглянути різні варіанти збільшення тривалості експлуатації зношених бандажів і оцінити доцільність їх застосування. Як говорилося раніше, одним з можливих шляхів збільшення ресурсу бандажів є зміна умов подачі матеріалу в валки, тобто зміна $\alpha_{пр}$. У лівій частині номограми показані залежності параметрів ущільнення Ky_k, $\rho_{br.k}$ та енергосилових P_k, M_k параметрів від кута пресування для різного ступеня зносу бандажів. Для визначення допустимого діапазону зміни кута пресування в даному прикладі задається умова P_k≤1000 кН, M_k≤56 кН×м, яка встановлює межі областей В, B_1, С и C_1. Встановлені в розглянутому прикладі умови регулювання кута пресування для різного ступеня зносу бандажів наведені в табл. 2.21.

Таблиця 2.21 – Параметри брикетування на різних стадіях зносу

Ступінь зносу k	Період експлуатації n_k, об.	δ_k, мм	Діапазон регулювання α_{pr}, град.	Ky_k	$\rho_{br.k}$, г/см^3	P_k, кН	M_k, кН·м
0	0	0,50	10,0…12,8	1,8…2,30	3,6…4,9	200…480	18…48
1	20000	2,31	11,0…13,3	1,8…2,29	3,6…4,8	200…520	18…56
2	40000	4,11	11,3…14,0	1,8…2,19	3,6…4,6	200…520	18…56
3	60000	5,92	12,0…14,5	1,8…2,14	3,6…4,5	200…520	18…56
4	80000	7,72	13,0…15,3	1,8…2,14	3,6…4,5	200…520	18…56
5	100000	9,52	13,0…15,7	1,8…2,14	3,6…4,5	200…520	18…56

Аналіз розрахункових даних показує, що в розглянутому прикладі для заданих базою знань властивостей шихти і характеристик бандажів допускається діапазон регулювання кута пресування в межах 10,0°… 15,7°.

Наступне завдання, яке можна вирішити за допомогою номограми – розширення експлуатаційного діапазону бандажів шляхом коригування властивостей шихти, що брикетується.

Зміна властивостей шихти впливає на опір шихти стиску - параметр, що визначає величину контактних напружень на робочих поверхнях бандажів і, відповідно, їх знос.

Далі наведено приклад, в якому були виконані наступні коригування у вихідних даних

Приклад 2.

Властивості шихти:

- гранулометричний склад GranS – фр. -3 мм;
- вид сполучного Binder – органічне сполучне;
- вміст сполучного в шихті B%=1,5%;
- насипна щільність шихти ρ_{nas}=2,17 г/см^3;
- рівняння, що описує опір шихти стиску $p = a \cdot Ky^b$,

де a=0,00213, b=12,8.

В результаті зміни насипної щільності необхідна щільність брикетів 3,8…4,9 г/см^3 досягається при менших значеннях коефіцієнта ущільнення і тисках пресування. Так, відповідно до кривих ущільнення (див. Розділ 2.2.1), тиск пресування, при якому досягається щільність брикетів 4,9 г/см^3, знижується з 102 МПа до 65 МПа. Максимальні значення нормальних контактних напружень зменшилися на зубцях з 81,3 МПа до 42,3 МПа, на жолобі з 102,0 МПа до 81,3 МПа. Це, в свою чергу, призводить до зменшення зносу бандажів.

Відповідно до попереднього прикладу виконані розрахунки (табл. 2.22) і побудована номограма технологічних і енергосилових параметрів брикетування для змінених властивостей шихти, яка представлена на рис. 2.31.

Таблиця 2.22 – Параметри брикетування на різних стадіях зносу

Ступінь зносу k	Період експлуатації n_k, об.	δ_k, мм	Діапазон регулювання α_{pr}, град.	Ky_k	$\rho_{br.k}$, г/см^3	P_k, кН	M_k, кН·м
0	0	0,50	9,6…12,4	1,8…2,30	3,6…4,9	125…333	11…32
1	20000	1,94	10,1…13,1	1,8…2,30	3,6…4,9	134…373	12…37
2	40000	3,38	10,6…13,7	1,8…2,30	3,6…4,9	119…395	11…39
3	60000	4,82	11,2…14,5	1,8…2,30	3,6…4,9	111…452	9…46
4	80000	6,25	11,7…15,2	1,8…2,30	3,6…4,9	92…487	8…51
5	100000	7,69	12,2…15,9	1,8…2,20	3,6…4,8	85…511	6…56
6	120000	9,13	12,4…16,2	1,8…2,17	3,6…4,7	75…530	7…56

Порівняльний аналіз розрахункових даних і номограм рис. 2.30 і 2.31 показує, що максимально допустима величина зносу бандажів збільшилася з 8,5 мм до 9,0 мм. При цьому зазначені величини зносу досягаються в прикладі 1 за 87 816 оборотів валків, а після зміни властивостей шихти – за 118190, тобто ресурс експлуатації бандажів збільшився на 25,7%. Діапазон регулювання кута пресування знаходиться в межах 9,6°…16,2°, що також дозволяє збільшити експлуатаційний період бандажів.

Приклад 3.

Розглянемо приклад застосування експертної системи на стадії проектування пресового обладнання та вибору технологічного режиму брикетування.

Для даного прикладу властивості шихти в базі знань приймаються такі ж, як в прикладі 1 для шихти, що складається з 96,5% силікомарганцю (фр.-6 мм) і 3,5% органічного сполучного. Для вибору найбільш раціональних з точки зору зносу конструкцій бандажів в базу знань вводяться геометричні параметри бандажів формуючого елемента F1.

Порівняння з прикладом 1 показує, що при використанні збільшеного формуючого елемента F1 максимально допустима величина зносу бандажів зросла до 11,3 мм. При цьому експлуатаційний період даного комплекту бандажів збільшився з 87820 до 100250 оборотів, тобто на 12,4%. Крім того, значно розширився діапазон регулювання кута пресування (табл. 2.21 і табл.

2.25), що є додатковим ресурсом тривалості роботи бандажів пропонованої конструкції.

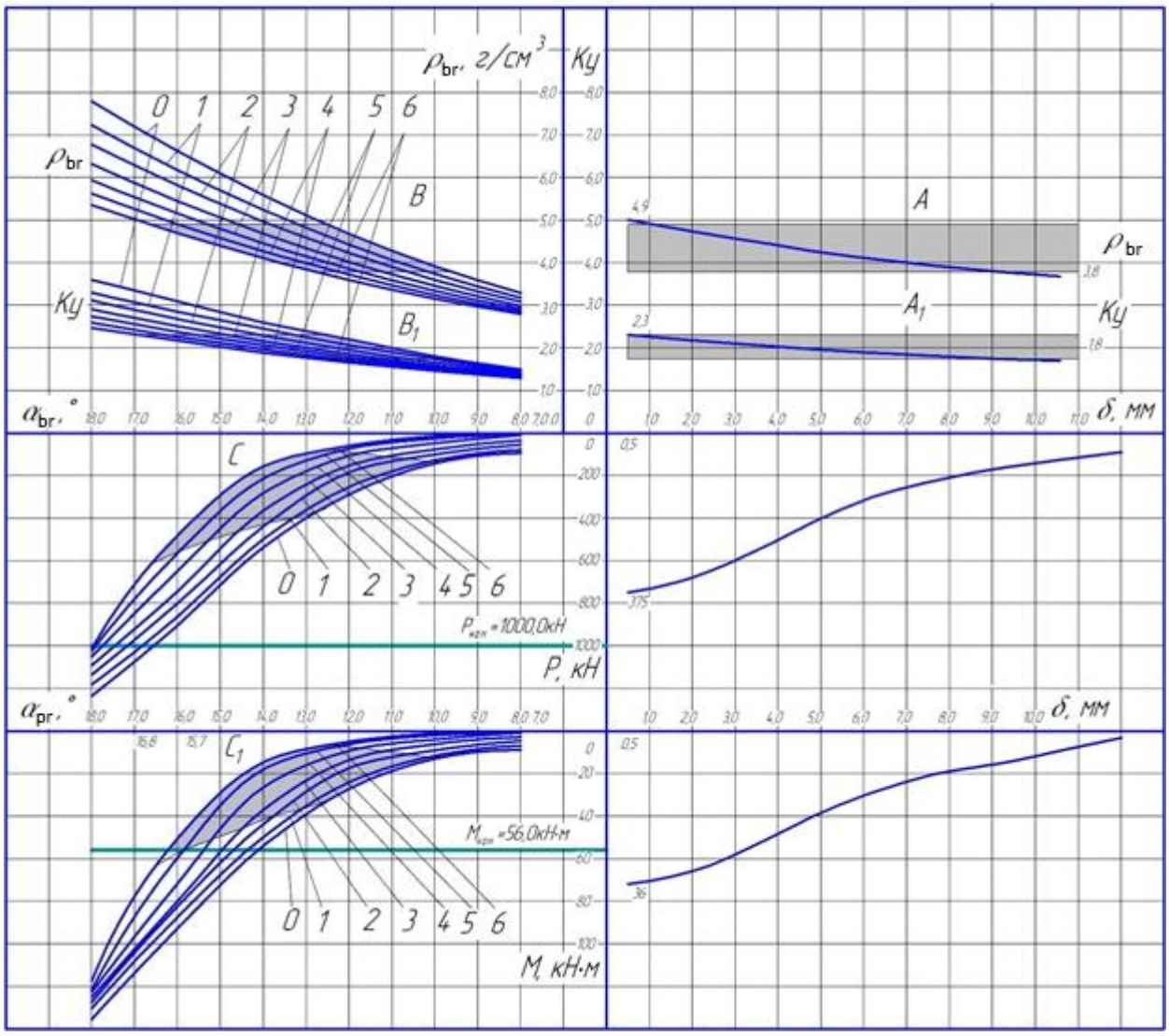


Рисунок 2.31 – Номограма параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F2

Шихта: 98,5% силікомарганцю (фр. -3мм) і 1,5% органічного сполучного

Геометричні параметри і властивості бандажів:

Таблиця 2.23 – Координати формуючого елемента в поперечному перерізі бандажа для вихідного контуру

$x_{p.i}$, мм	-29,96	-27,84	-23,69	-19,84	-16,00	-12,33	-8,76	-5,24	-1,76	0	1,76	5,24	8,76	12,33	16,00	19,84	23,69	27,84	29,96
$y_{p.i}$, мм	0	3,20	9,48	15,23	19,34	21,92	23,62	24,66	25,16	25,22	25,16	24,66	23,62	21,92	19,34	15,23	9,48	3,20	0

Таблица 2.24 – Координати формуючого елемента в поздовжньому перетині бандажа для вихідного контуру

$x_{pr.i}$, мм	0	6,50	13,00		19,50	26,00	31,55	32,90	39,00	45,50	52,00	58,50	65,00
y_{pri}, мм	0	0,71	2,96		7,20	15,03	27,00	30,00	42,95	50,45	54,36	56,8	57,50

Таблица 2.25 – Параметри брикетування на різних стадіях зносу

Ступінь зносу k	Період експлуатації n_k, об.	δ_k, мм	Діапазон регулювання α_{pr}, град.	Ky_k	$\rho_{br.k}$, г/см^3	P_k, кН	M_k, кН·м
0	0	0,50	12,0…15,5	1,8…2,30	3,6…4,9	280…480	25…48
1	20000	2,66	11,0…16,5	1,8…2,30	3,6…4,8	250…540	24…56
2	40000	4,81	13,5…16,8	1,8…2,19	3,6…4,6	230…540	23…56
3	60000	6,97	14,3…17,2	1,8…2,19	3,6…4,5	210…540	22…56
4	80000	9,12	15,0…17,8	1,8…2,10	3,6…4,4	205…540	21…56
5	100247	11,27	15,8…18,3	1,8…2,05	3,6…4,3	200…540	20…56

Геометричні параметри формуючого елемента впливають, як на величину ущільнення, що досягається, так і на інтенсивність зносу бандажів. Характер цього впливу відрізняється різноманіттям і неоднозначністю. Так, наприклад, збільшення розмірів формуючого елемента, як видно, з виразу

$$Ky = Cos\,\alpha_{\text{pr}} + \frac{L_M\,(1 - Cos\,\alpha_{\text{pr}})}{H + \delta} \qquad (2.35)$$

призводить до зменшення величини ущільнення, яке досягається. Для отримання заданого коефіцієнта ущільнення необхідно збільшити кут пресування, при цьому збільшується протяжність поверхні взаємодії шихти з робочою поверхнею бандажа. Як показують виконані в даному прикладі розрахунки, ступінь впливу зносу на величину технологічних і енергосилових параметрів знижується (ліва частина номограми рис. 2.32).

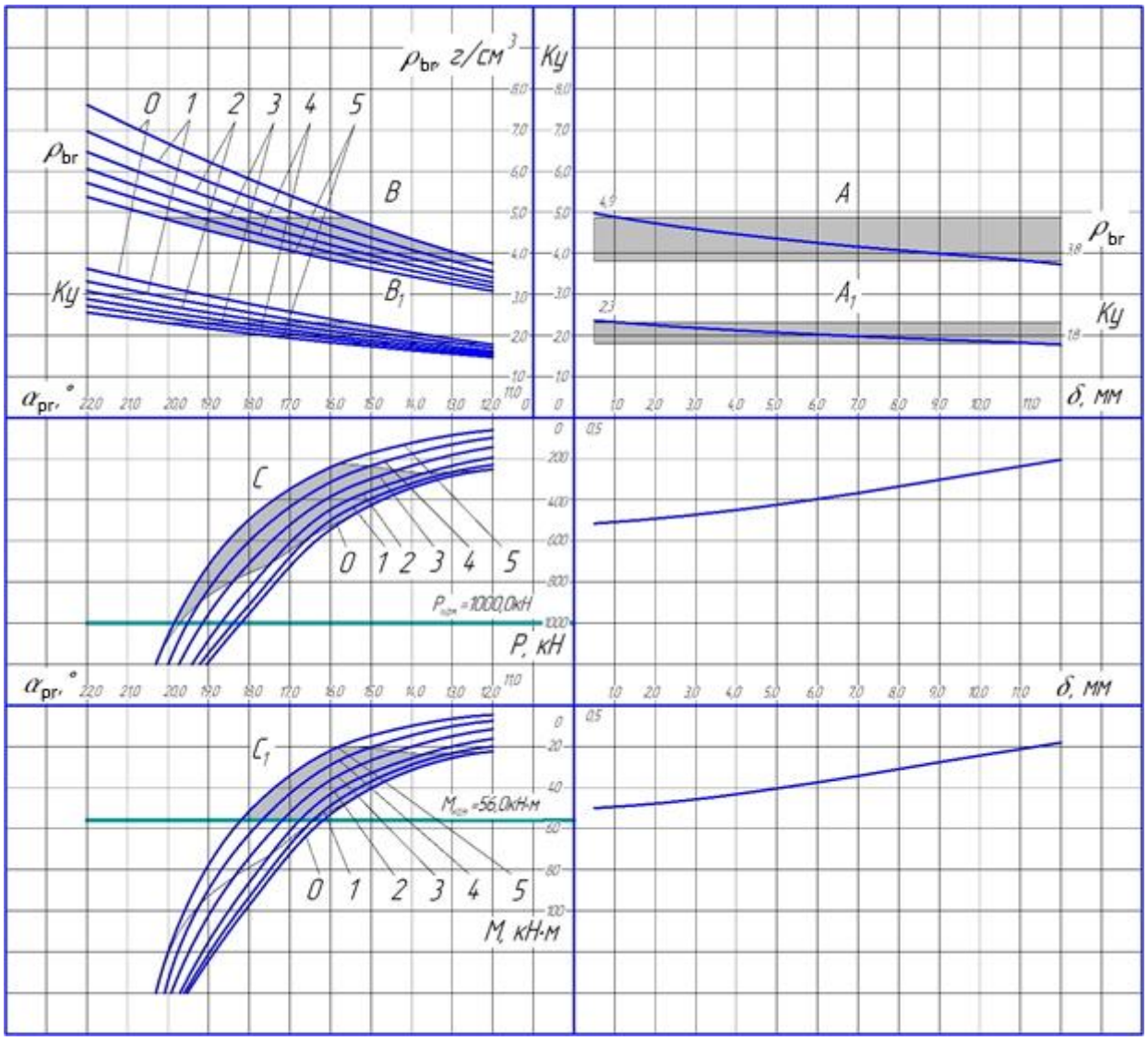


Рисунок 2.32 – Номограма параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F1

Шихта: 96,5% силікомарганцю (фр. -6мм) і 3,5% органічного сполучного

Розроблений системний підхід дозволяє врахувати вплив кожного із зазначених факторів окремо, їх взаємний вплив, оцінити можливі поєднання і комбінації, тобто. оптимізувати роботу з вибору раціональних конфігурації та розмірів формуючих елементів. Системний підхід, також дозволяє оптимізувати вибір технологічних режимів брикетування.

Однією з характеристик, що визначають опір шихти стиску, є вміст вологи в матеріалі, що брикетується.. Виконаєм порівняльний аналіз параметрів експлуатації бандажів для умов брикетування каоліну марки КВ-1 з вологістю 10% і 15%.

Приклад 4.

Властивості шихти:

- вологість шихти W=10%;

- насипна щільність шихти ρ_{bulk}=0,99 г/см^3;

- коефіцієнти зовнішнього f_1=0,773, внутрішнього f_2=0,627, тертя і бічного тиску ξ=0,3;

- коефіцієнт ущільнення *Ку*=2,1;

- рівняння, що описує опір шихти стисканню $p=aKy^b$,

де a=0,032, b=7,87.

Властивості шихти:

- вологість шихти W=15%;

- насипна щільність шихти ρ_{bulk} =1,0 г/см^3;

- коефіцієнти зовнішнього f_1=0,773, внутрішнього f_2=0,627, тертя і бічного тиску ξ=0,3;

- коефіцієнт ущільнення *Ку* =2,1;

- рівняння, що описує опір шихти стисканню $p=aKy^b$,

де $a=5{,}743\cdot10^{-6}$, b=19,72.

Властивості брикетів:

Щільність брикетів ρ_{br}= 2,1 г/см^3.

У цьому прикладі досліджувалися умови експлуатації бандажів експериментального валкового преса ІЧМ з формуючими елементами конфігурації F3.

Геометричні параметри і властивості бандажів:

Таблиця 2.26 – Координати формуючого елемента в поперечному перетині бандажа для вихідного контуру

$x_{p.i}$, мм	-16,5	-15,01	-12,03	-9,05	-6,08	-2,56	0	1,49	3,50	5,53	9,48	13,23	15,78	16,5
$y_{p.i}$, мм	0	1,36	4,07	6,79	9,51	12,36	13,48	13,83	14	13,83	12,4	9,02	2,6	0

Таблиця 2.27 – Координати формуючого елемента в поздовжньому перетині бандажа для вихідного контуру

$x_{pr.i}$, мм	0	3,00	6,00	9,00	10,88	12,36	14,22	14,76	15,63	18,00	21,00	24,00	27,00	30,00
$y_{pr.i}$, мм	0	0,33	1,35	3,28	5,19	7,43	14,00	17,00	21,30	26,00	29,00	30,75	31,7	32,00

Міжосьова відстань валків преса L_M=498,5 мм;

Радіуси бандажів R_1=265 мм; R_2=233 мм;

Величина зазору між валками δ=0,5 мм.

Величина твердості робочих поверхонь бандажів по Брінеллю НВ=6540 МПа.

Раніше для цих бандажів і зазначеної шихти виконані розрахунково-аналітичні і експериментальні дослідження (див. Розділ 2.3.5). Номограми для даного прикладу наведені на рис. 2.33 і 2.34.

У певному інтервалі кількість вологи, що міститься в каоліні, впливає на процес його ущільнення, а, відповідно, і на знос бандажів преса. В результаті збільшення вмісту вологи каоліну з 10% до 15% істотно змінилося опір шихти стиску. Виходячи з кривих ущільнення (див. Розділ 2.2.1), необхідна щільність брикетів, рівна 2,1 г/см^3, при вологості каоліну 10%, досягається при тиску пресування 30 МПа, при вологості каоліну 15% ця щільність досягається при тиску пресування 14 МПа. Зменшення величини тиску пресування призводить до зниження контактних напружень на робочій поверхні бандажів і, як наслідок, до значного зниження зношування бандажів.

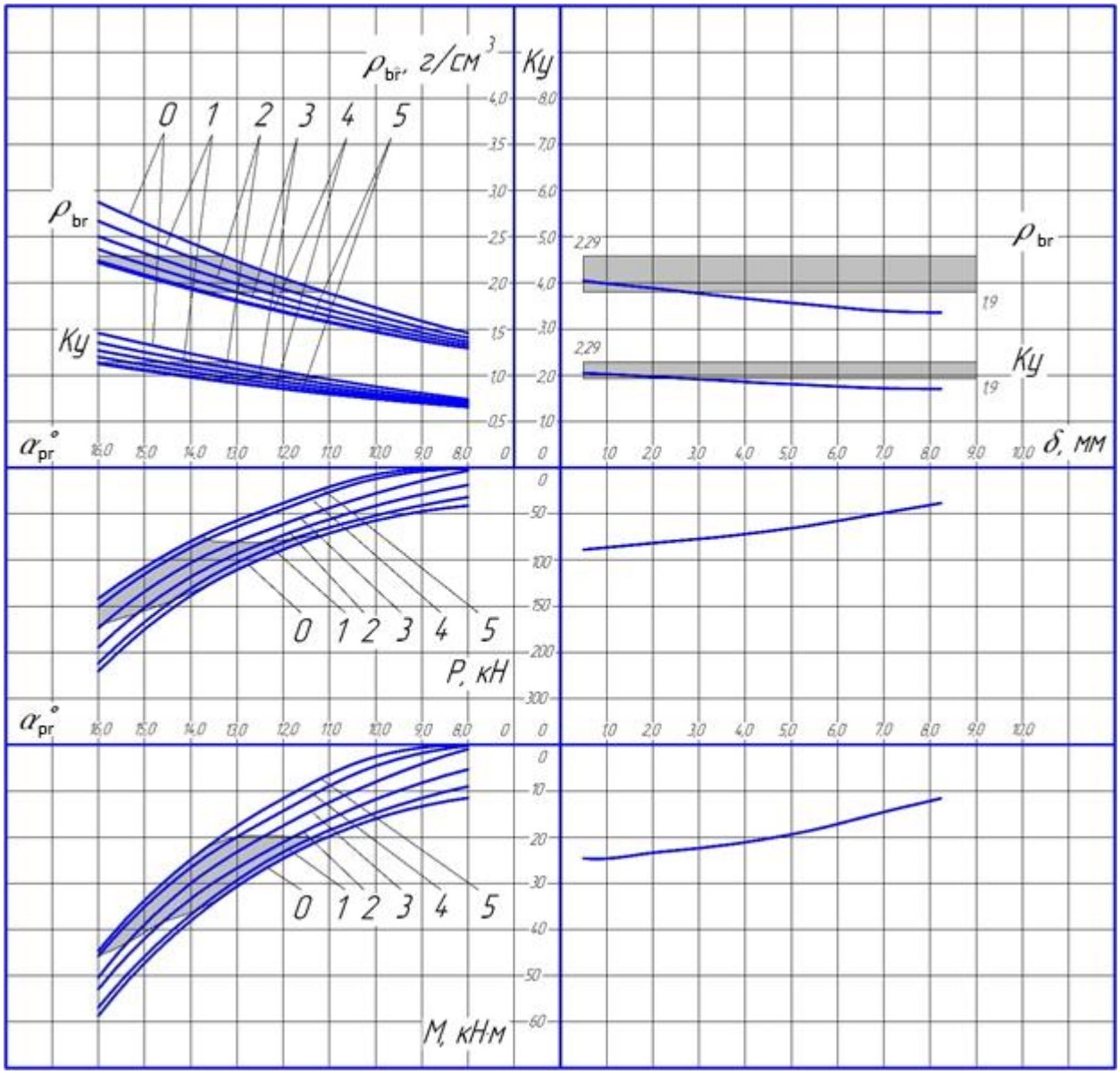


Рисунок 2.33 – Номограма параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F3

Шихта: каолін з вологістю 10%

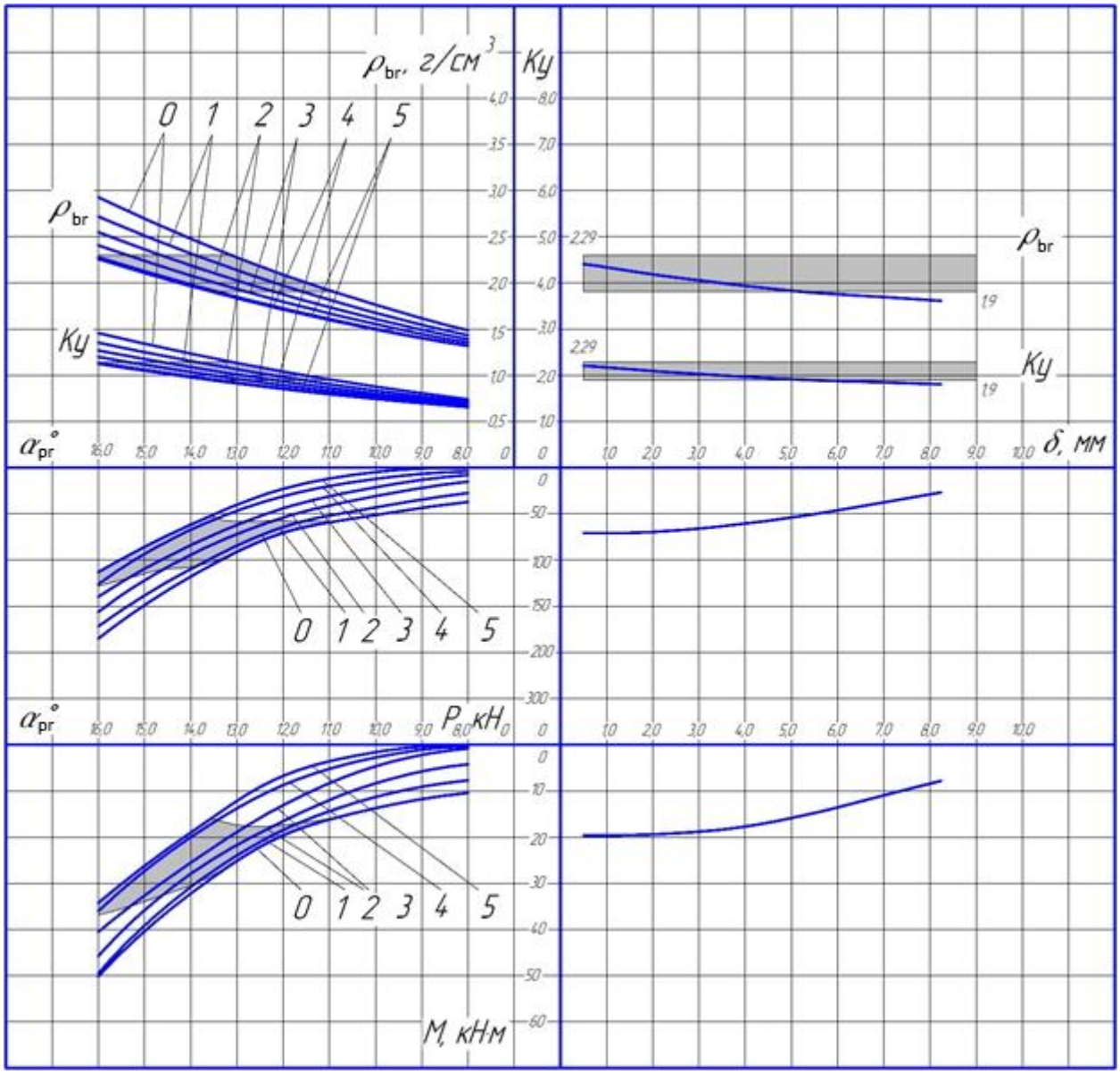


Рисунок 2.34 – Номограма параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F3

Шихта: каолін з вологістю 15%

Приклад 5.

На технологічні та силові параметри брикетування і знос бандажів впливає вид застосовуваної сполучної речовини. Виконаємо порівняльний аналіз умов експлуатації бандажів при брикетуванні шихт на основі коксового дріб'язку з двома різними видами сполучної речовини.

Властивості шихти:

- вологість шихти W=8…12%;
- гранулометричний склад GranS – фр. -5 мм;
- тип сполучного Binder – вапно, меляса;
- вміст сполучного в шихті B%=7,5% вапна та 7,5% меляси;
- насипна щільність шихти ρ_{bulk}=0,54 г/см^3;
- коефіцієнти зовнішнього f_1=0,2, внутрішнього f_2=0,3, тертя і бічного тиску ξ=0,61;
- коефіцієнт ущільнення Ky=2,79;
- рівняння, що описує опір шихти стисканню $p=aKy^b$, де a=0,0382, b=6,77.

Властивості шихти:

- вологість шихти W=8…12%;
- гранулометричний склад GranS – фр. -5мм;
- тип сполучного Binder – органічне сполучне;
- вміст сполучного в шихті B%=3% органічного сполучного;
- насипна щільність шихти ρ_{bulk}=0,54 г/см^3;
- коефіцієнти зовнішнього f_1=0,2, внутрішнього f_2=0,3, тертя і бічного тиску ξ =0,61;
- коефіцієнт ущільнення Ky=2,79;
- рівняння, що описує опір шихти стисканню $p=aKy^b$, де a=0,0276, b=7,36.

Властивості брикетів:

Щільність брикетів ρ_{br}=1,5 г/см^3.

Геометричні параметри і властивості бандажів:

В даному прикладі прийняті бандажі з формуючими елементами F2. На рис. 2.35 та 2.36 приведені номограми для розглянутого прикладу.

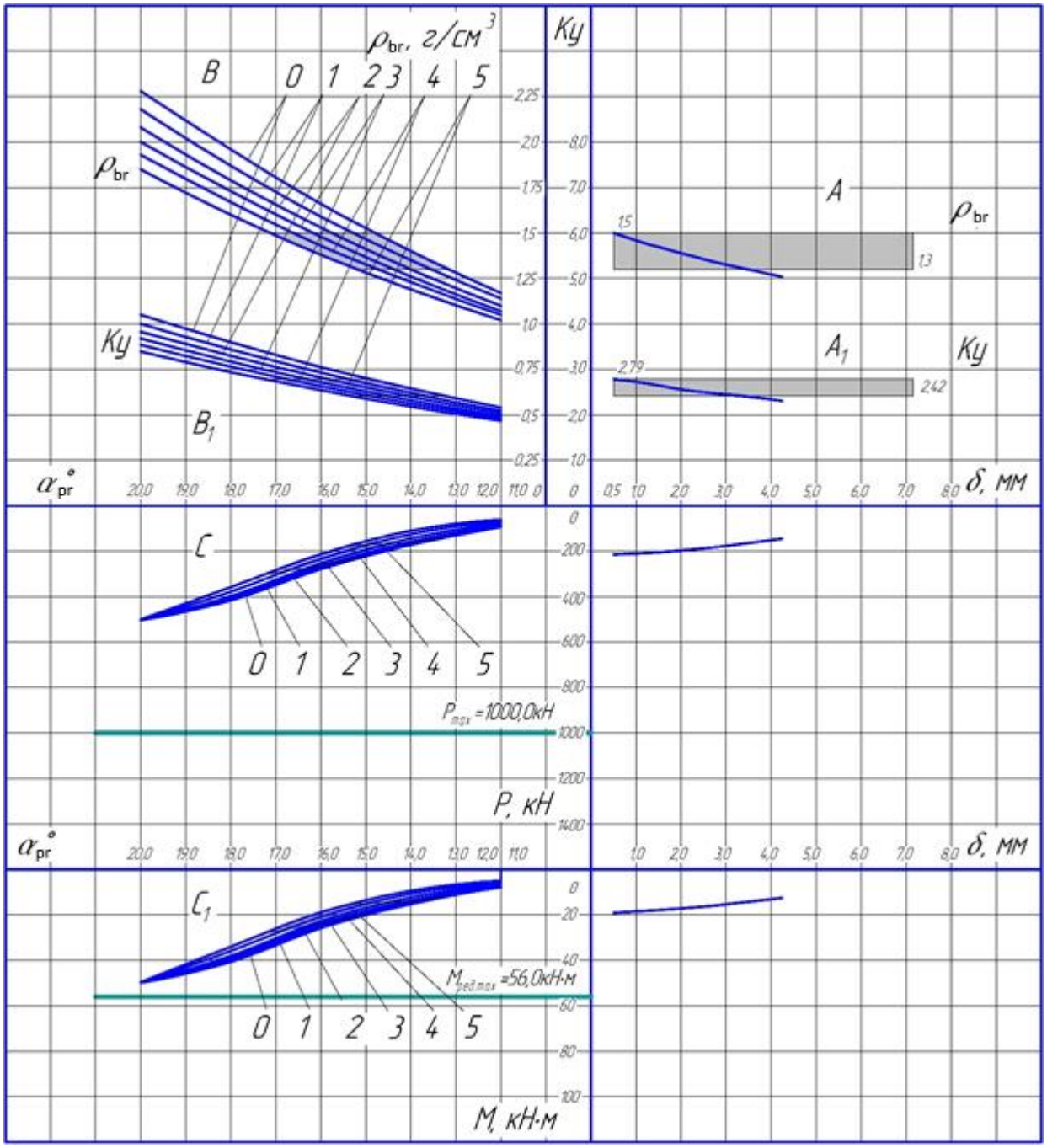


Рисунок 2.35 – Номограма параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F2

Шихта: 85% коксового дріб'язку 7,5 вапна і 7,5% меляси

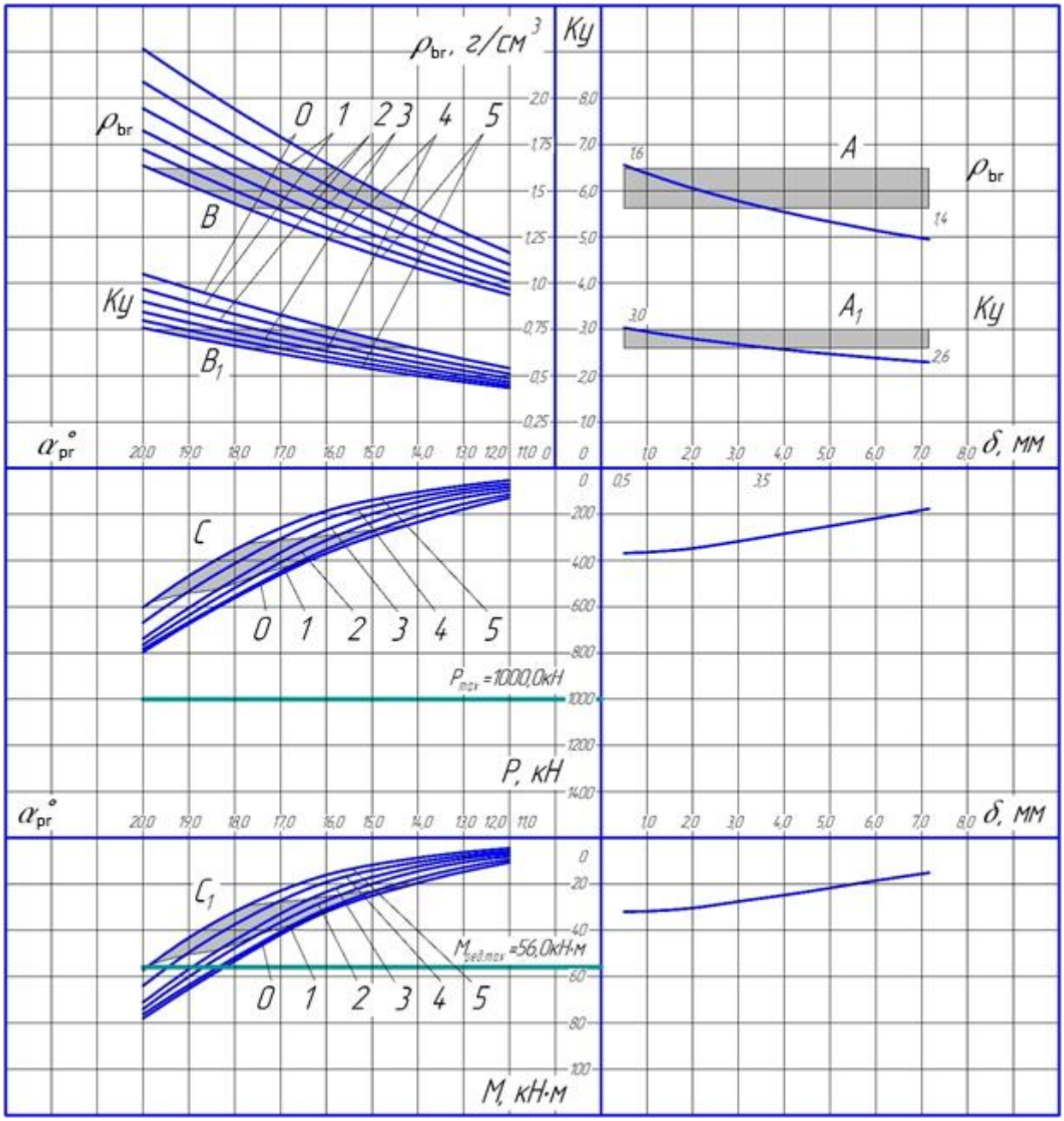


Рисунок 2.36 – Номограма параметрів брикетування для різного ступеня зносу бандажів

Конфігурація формуючих елементів: зубчасто-жолобчаста F2

Шихта: 97% коксового дріб'язку і 3% органічного сполучного

В результаті зміни сполучного істотно змінився опір шихти стиску. Виходячи з кривих ущільнення (див. Розділ 2.1), щільність брикетів дорівнює 1,5 г/см^3 при використанні органо-мінерального сполучного, та досягається при тиску пресування 52,5 МПа. При використанні органічного сполучного така щільність досягається при тиску пресування 40 МПа. Зменшення величини тиску пресування призводить до зниження контактних напружень на робочій поверхні бандажів і зниження зношування бандажів. Незважаючи на те, що величина максимально допустимого зносу бандажів однакова – 3,5 мм, досягається вона за різну кількість оборотів валків преса. При використанні органічного сполучного максимальний знос досягається за 55700 оборотів валків преса, а при використанні в якості сполучної речовини вапна і меляси – за 79950. Отже, в розглянутому прикладі заміна сполучної речовини дозволила збільшити ресурс експлуатації бандажів на 30%. Слід зазначити, що в умовах реального виробництва вид і кількість використовуваного сполучної речовини визначається рядом параметрів. До них відносяться наявність сполучного в достатніх для виробництва обсягах, економічна доцільність його застосування, умови технології, вимоги до брикетів і т.д. Розглянутий приклад показує, що створена в роботі система дозволяє при необхідності оцінити вплив застосовуваної в технології брикетування сполучної речовини на ресурс експлуатації бандажів.

В результаті виконання досліджень створено алгоритм експертної системи, яка реалізує комплексний підхід до вирішення завдання визначення раціональних режимів експлуатації бандажів при наявності їх зносу. На конкретних прикладах показані можливості системи в вирішенні завдань прогнозування і оцінки впливу зносу на енергосилові і технологічні параметри процесу брикетування, встановлення граничних величин зносу і вибору шляхів підвищення ресурсу бандажів за рахунок технологічних і технічних прийомів.

2.4.3. Розробка експлуатаційної карти бандажів валкових брикетних пресів

Багаторічна практика експлуатації промислового устаткування, в тому числі, на підприємствах гірничо-металургійного комплексу, дозволила розробити

комплекс заходів, нормативних документів і програмних засобів, які структурують і спрощують процеси накопичення, обробки інформації та прийняття рішень при експлуатації і технічному обслуговуванні обладнання [159-161]. На базі практичних рекомендацій щодо організації технічного обслуговування і ремонту, наведених в зазначених роботах, і практичного досвіду фахівців ІЧМ запропонована форма експлуатаційної карти (ЕК) комплекту бандажів (рис. 2.37).

Сформувати пропоновану ЕК дозволили результати теоретичних розрахунків і практичні дані, отримані при проведенні досліджень процесу брикетування відсівів феросплавів і режимів роботи валкового преса конструкції ІЧМ в промислових умовах на одному з підприємств, що виробляє брикети для металургійного виробництва.

Дана карта дозволить в процесі роботи комплекту бандажів в умовах діючого виробництва накопичувати дані про режими експлуатації бандажів і, в подальшому, в оперативному режимі здійснювати оцінку можливості експлуатації зношених бандажів, коригувати експлуатаційний режим пресового обладнання та технологічні характеристики шихти з метою збільшення робочого ресурсу даного комплекту.

На рис. 2.37 наведено конкретний приклад робочої ЕК комплекту бандажів [162]. У загальному вигляді робота з нею полягає в наступному. ЕК заповнюється початковими даними (рис. 2.37, табл.1-5) при передачі комплекту бандажів підприємству, яке буде здійснювати їх експлуатацію. До початкових даних відносяться основні характеристики преса і вихідні параметри бандажів, рекомендовані і прогнозні параметри брикетування на різних стадіях зносу бандажів для вихідної шихти і можливих її коригувань. Ці дані формуються на підставі результатів прогнозних і експертних досліджень, отриманих із застосуванням розрахунково-аналітичних методів [163, 164].

Діапазон щільності брикетів 3,8...4,9 г / см^3, зазначений в табл. 2 на рис. 2.37, визначає допустимі межі, яких необхідно дотримуватися на всьому періоді експлуатації бандажів для отримання брикетів необхідної якості.

ЕКСПЛУАТАЦІЙНА КАРТА БАНДАЖІВ

Дата введення в експлуатацію: лютого 2017р. Дата виведення з експлуатації: грудень 2017р.

Табл. 1 – Исходные параметры бандажей

Призначення	Брикетування відсівів силікомарганцю
Конфігурація формуючих елементів, тип бандажів:	зубчасто-жолобчаста
Розмір комірки, мм	63,6×60,0×27,0
Матеріал бандажів	Сталь 40ХН, твердість робочого шару 58…63HRC

Табл. 2 Параметри експертизи режимів брикетування

Діапазон щільності брикетів, г/см^3	3,8…4,9
Технічні характеристики преса: - механізм притиску валків - номінальне зусилля пресування, кН - номінальний момент пресування, кН·м - номінальна потужність електродвигуна преса, кВт - номінальний струм електродвигуна, А	 гідравлічний 1000 35 30 57,6

Табл. 3 – Рекомендовані параметри брикетування

Шихта	Матеріал	Властивості шихти					Технологічні та енергосилові параметри				
		ρ_{bulk}, г/см^3	*W*, %	Вид сполуч-ного	*B*,%	*GranS*, мм	α_{pr}, град	*Ky*	ρ_{br}, г/см^3	*P*, кН	*M*, кН·м
Вихідна шихта	Відсів силікомарганцю	2,10	3,5	ОС	3,5	-6	14,5	2,30	4,9	379	35
Скоригована шихта 1	Відсів силікомарганцю	2,17	3,5	ОС	1,5	-3	15,5	2,28	5,0	366	35

Табл. 4 – Прогнозні параметри брикетування на різних стадіях зносу (вихідна шихта)

δ, мм	α_{pr}, град.	*Ky*	ρ_{br}, г/см^3	*P*, кН	*M*, кН·м
0,50	14,5	2,14	4,5	379	35
2,66	14,8	2,06	4,3	376	35
4,81	15,3	2,01	4,2	374	35
6,97	15,9	1,99	4,2	372	35
9,12	16,5	1,98	4,1	367	35
δ_{max} =11,27	17,1	1,94	4,1	354	35

Табл. 5 – Прогнозні параметри брикетування на різних стадіях зносу (скоригована шихта 1)

δ, мм	α_{pr}, град.	*Ky*	ρ_{br}, г/см^3	*P*, кН	*M*, кН·м
0,50	15,5	2,28	5,0	366	35
2,31	15,7	2,22	4,8	363	35
4,14	16,1	2,16	4,7	363	35
5,95	16,4	2,11	4,6	361	35
7,76	16,8	2,07	4,5	356	35
9,59	17,3	2,05	4,5	350	35
δ_{max} =11,40	17,9	2,04	4,4	345	35

Відповідно до вимог технологічного процесу кількість прогнозних варіантів шихт і режимів брикетування може бути збільшено.

Рисунок 2.37 – Приклад експлуатаційної карти комплекту бандажів валкового преса

Продовження рисунка 2.37

Табл. 6 – Умови експлуатації преса

Дата	Матеріал	ρ_{nas}, г/см^3	≈W, %	Сполучне	*GranS*, мм	B, %	δ, мм	Параметри брикетування												Q, т
								Прогнозні (рекомендовані)						Встановлені						
								Ky	L_{reg}, мм	ρ_{br}, г/см^3	α_{pr}, град.	P, кН	M, кН·м	*Ky*	L_{reg}, мм	ρ_{br}, г/см^3	P, кН	M, кН·м	I_{dv}, А	n_v, мин$^{-1}$	
30.02.17	Відсів силіко-марганцю	1,98	3,5	ОС	-3	3	5	2,01…2,13	5	4,21…4,61	15,3…16,3	362…375	до 35,0	2,17	5	4,3	-	-	35…55	3	2500
30.04.17	Відсів силіко-марганцю	2,00	3,5	ОС	-5	3	6	1,99…2,11	5	4,18…4,57	15,6…16,5	360…373		2,20	5	4,4	-	-	35…55	3	
30.05.17	Відсів силіко-марганцю	1,90	3,5	ОС	-5	3	7	1,99…2,09	5	4,16…4,54	15,9…16,9	358…371		2,21	5	4,2	-	-	35…55	3	
30.06.17	Відсів силіко-марганцю	1,86	3,5	ОС	-5	3	8	1,98…2,07	5	4,15…4,52	16,1…17,0	355…368		2,20	5	4,1	-	-	35…55	3	
30.07.17	Відсів силіко-марганцю	1,95	3,5	ОС	-5	3	9	1,97…2,06	5	4,13…4,50	16,4…17,2	353…365		2,21	7	4,3	-	-	35…45	3	
30.08.17	Відсів силіко-марганцю	1,98	3,5	ОС	-5	3	10	1,96…2,05	7	4,12…4,48	16,7…17,4	350…361		2,12	7	4,2	-	-	35…45	3	
30.09.17	Відсів силіко-марганцю	2,00	3,5	ОС	-5	3	10,5	1,96…2,04	8	4,11…4,47	16,9…17,5	348…360		2,10	8	4,2	-	-	35…45	3	
30.10.17	Відсів силіко-марганцю	1,95	3,5	ОС	-5	3	11,0	1,96…2,04	8	4,11…4,46	17,1…17,6	346…357		2,10	8	4,1	-	-	35…40	3	
30.11.17	Відсів силіко-марганцю	2,10	3,5	ОС	-5	3	11,5	1,96…2,04	9	4,10…4,45	17,2…17,7	344…355		1,90	9	4,0	-	-	20…30	3	
30.12.17	Відсів силіко-марганцю	2,00	3,5	ОС	-5	3	12,0	1,95…2,04	10	4,10…4,45	17,4…17,9	342…352		1,90	10	3,8	-	-	20…25	3	

W, % – вологість шихти;
GranS – гранулометричний склад шихти (фракція);
B, % – процентний вміст сполучного;
δ_k, мм – величина зносу робочої поверхні бандажів;
α_{pr} – кут пресування, що встановлюється шляхом регулювання завантажувального пристрою;
L_{reg}, мм – положення пристрою регулює подачу шихти в осередок деформації;
Ky – коефіцієнт ущільнення шихти;
ρ_{br}, г/см^3 – щільність брикетів;
P, кН – зусилля пресування;
M, кН·м – момент пресування;
I_{dv}, А – струм електродвигуна приводу преса;
n_v, хв$^{-1}$ – частота обертання валків преса;
Q, т – кількість тон вироблених брикетів.
Примітки:

При цьому енергосилові параметри процесу брикетування (P, M, I_{dv}) не повинні перевищувати технічні характеристики преса (рис. 2.37, табл. 2), щоб уникнути перевантаження або виходу з ладу пресового устаткування.

В реальних виробничих умовах мають місце коливання властивостей шихти. Тому на різних стадіях зносу важливе регулювання параметрів брикетування з урахуванням конкретних властивостей шихти для забезпечення отримання якісних брикетів і нормальної роботи пресового обладнання. Тому, з урахуванням сировинних можливостей на виробництві з використанням ЕК можна оперативно скорегувати склад шихти таким чином, щоб забезпечити максимальну тривалість експлуатації бандажів за умови отримання брикетів, що відповідають вимогам технологічного регламенту.

У табл. 3 на рис. 2.37 наведені рекомендовані параметри брикетування, що відповідають умовам роботи нового, незношеного комплекту бандажів. В даному прикладі наведено для двох варіантів шихтовки. Таких варіантів може бути більше при необхідності. Дана таблиця містить найбільш раціональні з прогнозованих варіантів реалізації технології брикетування, на які варто орієнтуватися при веденні процесу брикетування на виробництві.

Тим часом, в процесі зносу бандажів будуть змінюватися геометричні характеристики пресуючих поверхонь, відповідно, умови захоплення матеріалу валками, що потребують коригування режимів брикетування для забезпечення умов отримання брикетів необхідної якості, в першу чергу, щільності. Тому в табл. 4 і 5 на рис. 2.37 наведені прогнозні теоретичні параметри процесу брикетування на різних стадіях зносу бандажів для раціональних складів шихт, що брикетуються. Інформація цих таблиць, спільно з даними (табл. 2, 3 на рис.2.37) представляють собою рекомендації, що дозволяють вибрати раціональний режим брикетування з урахуванням зносу бандажів і властивостей шихти, що брикетується.

Об'єктом промислових досліджень були бандажі зубчасто-жолобчастої конфігурації з розмірами осередку 63,6×60,0×27,0мм. Брикетована шихта на основі

силікомарганцю розміром від -6мм до -3мм. Щільність брикетів визначалася вимогами технологічного регламенту.

Рекомендовані параметри брикетування для нових незношених бандажів (табл. 3 на рис. 2.37) і зміна параметрів в процесі зносу бандажів (табл. 4, 5 на рис. 2.37) розраховані з використанням створеного в даному розділі роботи аналітичного апарату. При цьому фізико-механічні властивості шихт, що визначають їх поведінку при брикетуванні і використовуються в прогнозних розрахунках, визначені експериментально.

Фактичні показники експлуатації преса (табл. 6 на рис. 3.37), відображені в ЕК, реєструвалися в процесі промислових випробувань і заносилися в робочий журнал, оброблялися і контролювалися фахівцями ІЧМ. Протягом усього періоду експлуатації комплекту бандажів коригування шихти і режимів пресування здійснювалося з використанням в якості базових орієнтирів даних, наведених в табл. 2-5 на рис. 2.37. Так, на підставі табл. 4-5 виконаний розрахунок прогнозних (рекомендованих) параметрів брикетування, на підставі яких проводилися коригування реальних режимів брикетування з метою забезпечення отримання брикетів необхідної якості (щільність 3,8...4,9 г/см^3) і роботи преса в межах його технічних характеристик (див. табл. 2. на рис. 2.37).

В результаті узагальнення даних про роботу преса в реальних промислових умовах встановлено, що фактичні показники процесу брикетування на різних стадіях експлуатації бандажів дещо відрізняються від рекомендованих (ЕК, рис. 2.37). Це пов'язано з нестабільністю фізико-механічних властивостей відсіву силікомарганцю, в першу чергу, за рахунок зміни процентного співвідношення великих і дрібних фракцій частинок в шихті. Але при цьому, орієнтуючись на рекомендовані параметри брикетування, вдалося в процесі всього циклу експлуатації комплекту бандажів забезпечити знаходження характеристик реального процесу виробництва брикетів в допустимих межах з точки зору якості одержуваних брикетів і роботи преса в рамках його технічних характеристик. Коефіцієнт ущільнення і щільність брикетів протягом усього періоду експлуатації знаходиться в заданому діапазоні 3,8…4,9 г/см^3. В ЕК не відображені фактичні значення зусилля і моменту пресування

P та *M*, так як даний прес, на відміну від ряду інших модифікацій, не оснащений спеціальними контрольно-вимірювальними пристроями. Однак, значення струму електродвигуна I_{dv} приводу преса за весь період експлуатації бандажів не перевищували номінальних значень. Не спостерігалося також спрацювання запобіжних пристроїв гідравлічної системи притиску валків. Це свідчить про те, що при коригуванні режимів брикетування на різних стадіях зносу бандажів не тільки забезпечені задані значення *Ky*, ρ_{br}, але і величини *P* та *M* знаходяться в межах технічних характеристик преса.

З огляду на нестабільний режим роботи технологічної лінії, пов'язаний з періодичністю поставки сировини на підприємство і різним об'ємом партій, які постачаються, вдалося точно зафіксувати лише загальну сумарну кількість продукції *Q*, виробленої за весь період експлуатації бандажів – 2500 т. В подальшому, при можливості, необхідно фіксувати не тільки загальне, але і проміжні значення кількості вироблених брикетів на різних стадіях зносу бандажів. Це дозволить уточнити ступінь наростання зносу в часі в залежності від обсягу виробленої продукції.

Висновки

1. Показано особливості зношування бандажів валкових пресів, що відбувається в результаті багаторазового пружного і пластичного деформування одних і тих же мікрооб'ємів матеріалу робочої поверхні на контактах з твердими частинками шихти, яке викликає втомне руйнування поверхневого шару матеріалу бандажів.
2. 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, та параметрами брикетування.
3. Розроблено математичну модель і новий розрахунково-аналітичний метод для оцінки зносу бандажів валкових пресів на різних стадіях їх експлуатації, що включає математичну модель визначення зносу з урахуванням властивостей матеріалів, що

брикетуються та побудову топограм зносу. 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.

4. Встановлено взаємозв'язки і отримані графічні й аналітичні залежності між величиною зносу бандажів, технологічними і енергосилових параметрів брикетування. На підставі встановлених залежностей між зносом бандажів і параметрами брикетування створений новий метод прогнозної оцінки параметрів брикетування при різному ступеню зносу бандажів за допомогою номограм.
5. Розроблено комплексний підхід до вирішення завдання визначення раціональних режимів роботи бандажів на різних стадіях їх зносу з урахуванням багатофакторності процесів брикетування і зношування бандажів, що використовується для вибору раціональних умов експлуатації бандажів.
6. Виконано випробування системного підходу на ряді прикладів прогнозування взаємозв'язку ступеня зносу бандажів валкових пресів з параметрами процесу брикетування для різних конфігурацій формуючих елементів шихт, що брикетуються.
7. Розроблено експлуатаційна карта 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 внести корективи в моделі і 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 устаткування.

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ ВПЛИВУ КОНФІГУРАЦІЇ ФОРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ПРУЖНУ ПІСЛЯДІЮ В БРИКЕТАХ

3.1. Формування науково-методичного підходу до дослідження впливу конфігурації формуючих елементів на пружну післядію в брикетах

У процесі виходу брикету з осередку деформації відбувається його всебічне розширення, зване пружною післядією. Це явище обумовлене розвитком пружних деформацій – складових контактної взаємодії частинок пресованого матеріалу. Механізм пружної післядії полягає в пружному відновленні контактів частинок після зняття тиску пресування [165].

Зазначений процес призводить до розущільнення брикетів і негативно впливає на їх якість. При значному пружному розширенні і нерівномірності його розподілу, обумовленої зміною формуючих елементів, в брикетах, крім зменшення щільності, можуть виникати порушення цілісності – тріщини і розшарування. Розвиток теоретичних положень, що пояснюють умови виникнення та механізм протікання цього явища, розробка експериментально-аналітичних методів об'єктивної оцінки його наслідків мають наукове і практичне значення. Формування кількісних і якісних критеріїв оцінки негативного впливу пружного розширення на фізико-механічні та структурні характеристики брикетів, вибір раціональних способів мінімізації наслідків пружного розвантаження міжчасткових контактів сприятимуть підвищенню ефективності розроблюваних технологій і пресового обладнання для брикетування дрібнофракційних матеріалів.

В ІЧМ раніше виконаний комплекс досліджень впливу зміни формуючих елементів на енергосилові і технологічні параметри брикетування дрібнофракційних шихт. На основі аналізу осередку деформації в валковому пресі запропоновані розрахункові схеми, які описують процес ущільнення

дрібнофракційної шихти з урахуванням всіх складових тиску пресування. Розроблено розрахунково-аналітичний апарат, який дозволяє з урахуванням зміни формуючих елементів, фізико-механічних властивостей шихти і її опору стисненню визначити величину і розподіл напружень в брикеті на різних стадіях його формування в осередку деформації валкового преса. Дані дослідження є науковою основою для створення методу оцінки впливу формуючих елементів на пружну післядію і якість брикетів.

Створені в роботі нові математична модель та експериментально-аналітичний метод дозволить прогнозувати величину і характер пружного розширення в брикеті для різних типорозмірів формуючих елементів з урахуванням властивостей матеріалів, що брикетуються, визначити раціональні геометричні параметри формуючих елементів, які забезпечують отримання брикетів необхідної щільності і міцності, моделювати нові модифікації формуючих елементів для зниження негативного впливу пружного розширення на якість брикетів.

Аналіз відомих досліджень пружної післядії дозволяє оцінити стан наукової бази, необхідної для розробки методів прогнозування впливу зміни формуючих елементів валкових пресів на величину і розподіл залишкових пружних деформацій.

Явище пружної післядії в пресовках і брикетах відомо давно, при цьому до теперішнього часу його вивченню приділялося мало уваги, а сучасні дослідження в даному напрямку практично відсутні.

Найбільший обсяг досліджень явища пружної післядії виконаний в області пресування виробів з металевих порошків і керамічних сполук [165-168]. В роботі [166] докладно описаний процес пресування дрібнофракційних матеріалів в пресформі. Як показано авторами, при пресуванні в циліндричному матричному каналі пружна післядія проявляється двічі. Спочатку, відразу після зняття тиску, коли брикет ще знаходиться в пресформі, матриця повертається в початковий стан і набуває вихідні розміри. Брикет при цьому стискається, його розміри по горизонтальних осях зменшуються, а висота збільшується, тобто

спостерігається осьова пружна післядія. Потім, в момент виходу брикету з порожнини пресформи, діаметр брикету збільшується, при цьому його висота залишається практично незмінною. Таке збільшення розмірів в горизонтальній площині називають радіальною пружною післядією. Після вилучення брикетів з пресформи з часом може відбуватися збільшення всіх його розмірів, але менше в порівнянні з описаними процесами.

В даний час для циліндричних пресовок використовуються поняття лінійної і об'ємної пружної післядії, значення яких розраховуються за такими формулами: по висоті

$$\delta_h = \frac{(h_1 - h_0)}{h_0} \cdot 100\%, \tag{3.1}$$

діаметру

$$\delta_d = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \cdot 100\%, \tag{3.2}$$

за об’ємом

$$\delta_V = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \cdot 100\%, \tag{3.3}$$

де h_0, d_0 та V_0 – висота, діаметр та об’єм брикету, що знаходиться в пресформі під дією тиску пресування; h_1, d_1 та V_1 – висота, діаметр та об’єм брикету після зняття тиску та/або вилучення з пресформи. Методи визначення зазначених величин описані в ГОСТ 290012-91 [168].

Виконані фахівцями в галузі порошкової металургії і виробництва керамічних виробів дослідження спрямовані на встановлення основних факторів, що визначають умови розвитку процесу пружної післядії, визначення ступеня і характеру його впливу на якісні характеристики брикетів. Особливий інтерес викликають результати експериментальних досліджень пружної післядії і пов'язаних з ним процесів для умов пресування металевих порошків, наведені в роботі М. Ю. Бальшина [166]. На основі цих досліджень запропоновані емпіричні розрахункові формули, що встановлюють зв'язки між властивостями частинок металевих порошків і величиною пружної післядії.

Кипарисов С.С. та Либенсон Г.А. [167] на підставі результатів експериментів з пресування мідного, залізного і олов'яного порошків проаналізували зміну величини пружної післядії в пресовках зі збільшенням тиску пресування. Зазначено, що негативний вплив на міцність, наявність дефектів в пресовках більшою мірою проявляється для порошків тендітних і твердих матеріалів. Показано, що зменшити ймовірність виникнення дефектів в пресовках, викликаних залишковими пружними деформаціями, можна правильним підбором типу і кількості пластифікатора.

У більшості розглянутих публікацій, як правило, аналізувався вплив окремо виділених факторів, наприклад, вологості, крупності частинок, тиску. Доцільність і достовірність цих досліджень не викликає сумнівів, проте їх практичне використання проблематично, так як більшість результатів було отримано для обмеженої номенклатури матеріалів і строгих граничних умов експерименту. Вплив зміни пресовок на розвиток дефектів, викликаних пружною післядією, не досліджувався.

Виконаний аналіз літературних джерел показує, що в теорії і практиці ущільнення дрібнофракційних та порошкових матеріалів дослідження явища пружної післядії в основному спрямовані на вирішення розрізнених, часто не пов'язаних між собою окремих завдань, обмежених конкретними матеріалами та прийнятим, як правило, вузьким діапазоном тиску пресування. Літературні дані свідчать про недостатню вивченість, суперечливості уявлень про вплив різних чинників на умови розвитку пружної післядії при пресуванні. До теперішнього часу не сформовано єдиних модельно-теоретичних та емпіричних, підтверджених експериментами, методів оцінки ефекту пружної післядії у виробах, одержуваних шляхом пресування дрібнофракційних матеріалів.

При аналізі доступних інформаційних джерел не знайдено результативних спроб дослідження впливу конфігурації формуючих елементів валкових пресів на величину та розподіл залишкових напружень і деформацій в брикетах. В даний час практично відсутні роботи, присвячені вивченню впливу пружного післядії на якість брикетів, сформованих в валкових пресах. В роботі [1] показано, що для валкових

пресів величина зони пружного розширення становить близько 2…3° дуги осередку деформації. Ці дані встановлені на основі практичного досвіду і аналізу параметрів осередку деформації в валковому пресі.

В літературі не представлені теоретично обґрунтовані об’єктивні критерії та єдині методи оцінки, що дозволяють для конкретної шихти і геометричних параметрів осередку деформації прогнозувати величину пружного розширення і умови виникнення тріщин в брикетах. Вирази (3.1-3.2), справедливі для умов отримання брикетів циліндричної форми в замкнутому просторі пресформи. Вони не можуть бути застосовні для оцінки величини пружного розширення брикетів складної криволінійної конфігурації, отриманих в валковому пресі. Ущільнення шихти в об’ємі формуючих елементів, що поступово замикається, характеризується нерівномірністю розподілу напружень і деформацій в ущільнюваній шихті, що, в свою чергу, впливає на величину і розподіл залишкових деформацій в брикетах.

Єдиними дослідниками, які зробили спробу встановлення взаємозв’язку напружень в шихті в процесі формування брикетів з можливим утворенням тріщин, є R.T. Dec и A. Zavaliangos [142,143]. Виходячи з порівняльного аналізу розрахункових полів розподілу напружень і результатів експериментальних досліджень авторами показано, що різниця в величині напружень ≥15% між сусідніми шарами шихти в формованому брикеті може призводити до виникнення тріщин. Автори стверджують, що проведені ними дослідження вимагають подальшого розвитку, так як вони були виконані для одного матеріалу з одним типом сполучного і для чотирьох конфігурацій формуючих елементів. Дані дослідження не дають відповідей на питання, якою мірою відбувається розущільнення брикетів під впливом залишкових пружних деформацій і як взаємопов'язані величина пружної післядії, властивості шихти і конфігурація формуючих елементів.

Відома робота [170], в якій наводяться результати досліджень, спрямованих на пошук шляхів зменшення негативного впливу пружної післядії. Відзначається, що застосування схем пресування, які інтенсифікують деформації

зсуву, сприяє утворенню більш тісних і міцних зв’язків між частинками, що дозволяє істотно знизити негативний вплив пружної післядії. У цьому плані робота [169] підтверджує правильність припущення про те, що, коректуючи конфігурацію формуючих елементів і параметри осередку деформації в валковому пресі, які як раз і є факторами, що визначають зміну параметрів напружено-деформованого стану, а, саме, інтенсивність зрушень в ущільнюваної шихті, можна мінімізувати негативний вплив пружної післядії на якість брикетів.

Метою даного розділу роботи є розвиток науково-обґрунтованої методичної бази для оцінки впливу зміни формуючих елементів на величину і характер пружної післядії в брикетах, а також для визначення раціональних параметрів осередку деформації валкових пресів, що забезпечують зниження негативної дії залишкових напружень на якість продукції. Для досягнення зазначеної мети прийнята концепція, яка полягає в експериментально-аналітичному дослідженні величини і характеру пружної післядії в брикеті на основі аналізу напружено-деформованого стану на різних стадіях ущільнення, побудови полів напруги і відповідних епюр розподілу пружного розширення і характеристик ущільнення для різних конфігурацій формуючих елементів.

У ІЧМ раніше проведені дослідження [76,77,87,133,135,136,172,173] впливу конфігурації формуючих елементів на енергосилові параметри валкових пресів та характеристики брикетів – коефіцієнт ущільнення і щільність. Ці дослідження показують, що величина і розподіл напружень, розвиток зсувних деформацій в матеріалі, що брикетується, обумовлені схемою осередку деформації і складною криволінійною конфігурацією поверхонь формуючих елементів. Показано, що, використовуючи експериментально встановлені залежності, що характеризують опір стисненню матеріалу, що брикетується, та отримані розрахунковим шляхом полях розподілу напружень в ущільнюваному матеріалі, можна визначити величину і розподіл деформації в брикетах.

З огляду на сказане вище, запропонована концепція, згідно з якою кожному значенню напруження, відповідно до полів їх розподілу в брикеті, буде відповідати певна величина пружного розширення після зняття тиску

пресування. Прийнята концепція і розроблені раніше методики визначення величини ущільнення та полів розподілу напружень дозволяють вирішити задачу створення нового розрахунково-аналітичного методу вивчення та оцінки впливу зміни формуючих елементів на пружну післядію в брикетах з урахуванням фізико-механічних властивостей шихти.

3.2. Експериментальні дослідження зв'язків параметрів ущільнення і пружної післядії з тиском пресування

3.2.1. Визначення параметрів ущільнення та пружної післядії для матеріалів з різними фізико-механічними властивостями

Для проведення експериментально-аналітичних досліджень з вивчення пружної післядії в брикетах прийняті матеріали: торф, каолін і марганцевий концентрат. Критерієм вибору даних матеріалів є сукупність фізико-механічних характеристик, що визначають різну ступінь чутливості їх до зовнішніх ущільнюючих силових дій. Далі коротко викладено умови, що визначили вибір зазначених матеріалів.

Торф. Мала насипна щільність, волокниста, гігроскопічна структура частинок зі значною пружністю роблять торф чутливим до змін технологічних параметрів брикетування, що дозволяє використовувати його в даній роботі як матеріал, для якого найбільш чітко буде проявлятися вплив пружної післядії на властивості брикетів.

Каолін. Основними фізико-механічними властивостями каоліну, які визначають умови його переробки, є гідрофільність, дисперсність, пластичність. Каолін вважається матеріалом, який добре піддається брикетуванню, є досить чутливим до поєднання вмісту в ньому вологи і тиску пресування, що дозволяє оптимізувати вибір силового режиму пресування. Для досягнення необхідного ступеня ущільнення і отримання міцних зразків не потрібно застосування високих значень тиску пресування.

Марганцевий концентрат. Відмінними рисами даного матеріалу є висока насипна щільність і значний опір стисненню. Для формування брикетів з заданими характеристиками необхідно для цього матеріалу збільшення зусилля пресування в порівнянні з торфом і каоліном.

Таким чином, обрані шихти мають істотні відмінності за властивостями і належать до різних груп систематизації матеріалів за їх здатністю до ущільнення [88], що дозволяє вважати отримані результати досліджень справедливими для широкого кола матеріалів.

Всі матеріали відсіяні до фракції -3 мм. Як показує практичний досвід брикетування дрібнофракційних матеріалів, така фракція найбільш сприятлива для отримання модельних зразків малих розмірів. Для підготовлених таким чином матеріалів визначено основні фізико-механічні характеристики, які представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Фізико-механічні характеристики досліджуваних матеріалів

Характеристики матеріалу	Матеріал		
	Торф	Каолін	Марганцевий концентрат
Вологість W , %	14,25	1,05	15,9
Насипна щільність, ρ_{bulk}, г/см^3	0,397	0,912	1,090
Твердість частинок за шкалою Мооса	≈2	2…2,5	≈3…5
Справжня (пікнометричним) щільність ρ_{pikn}, г/см^3	1,0…1,2 (0,15…0,5 твердий скелет)	2,35…2,42	3,0…3,5
Кут зовнішнього тертя φ,°	44,0	33,0	40,83
Коефіцієнт зовнішнього тертя f_1	0,96	0,64	0,87
Кут природного укосу φ_0,°	23,56	35,42	35,0
Коефіцієнт внутрішнього тертя f_2	0,44	0,71	0,70

Для проведення експериментів по встановленню параметрів деформації досліджуваних матеріалів використовувалися: гідравлічний прес ЦД-10 зусиллям пресування до 100 кН (10 тс) (рис. 3.1.), сталева циліндрична

пресформа з діаметром матричного каналу 30±0,1 мм і пуансони з плоскими торцями.

Пресування брикетів з прийнятих шихт здійснювалося в діапазоні тисків пресування від 10 до 100 МПа з кроком 10 МПа. Діапазон тисків пресування від 0 до 10 МПа при проведенні експериментів не брався до уваги, так як він відповідає початковій стадії ущільнення шихти з переважанням структурних деформацій, що включають перерозподіл часток і активне витіснення повітря. На даній стадії шихта ще не сформована в повноцінний брикет і являє собою попередньо ущільнене пухке тіло, вимірювання геометричних параметрів якого є скрутним, дає велику похибку і з практичної точки зору не представляє значного інтересу.

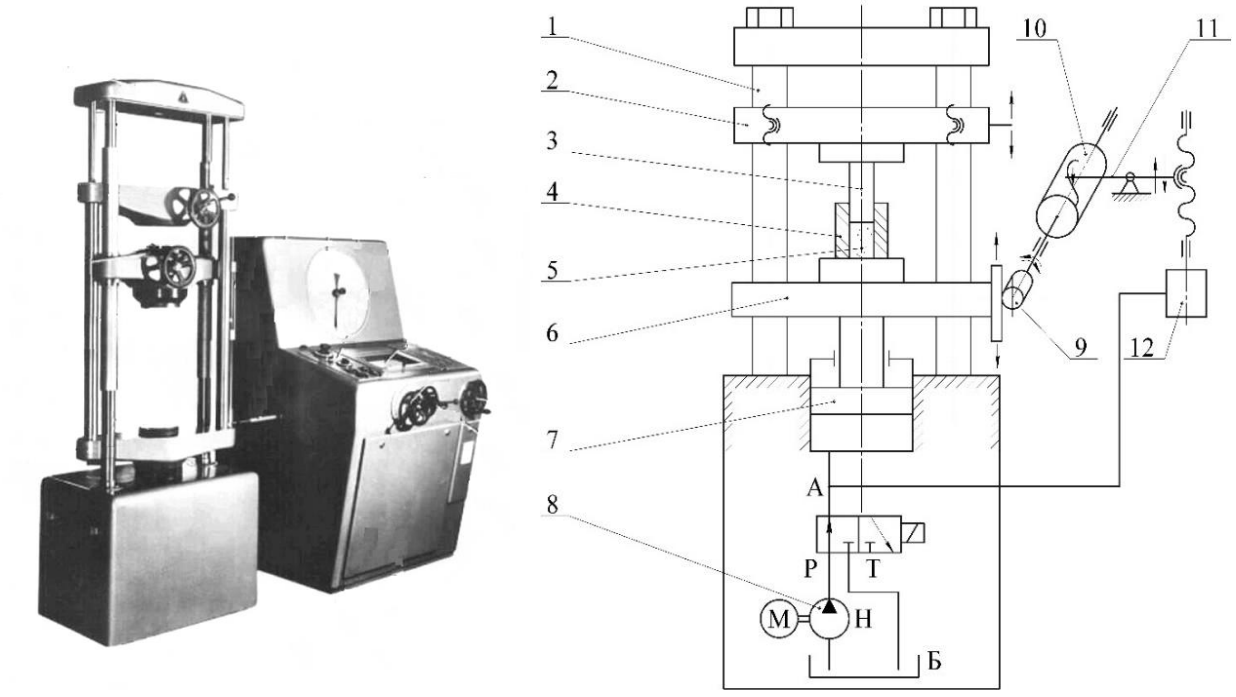


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд і схема гідравлічного преса, використовуваного для вивчення параметрів ущільнення дрібнофракційних шихт в прессформе
1 – колона; 2 – траверса верхня; 3 – пуансон; 4 – пресформа; 5 – матеріал, який пресується ; 6 – траверса нижня; 7 – гідроциліндр; 8 – насос; 9 – передавальний механізм; 10 – барабан самописця; 11 – перо самописця; 12 – перетворювач тиску

Для забезпечення точності результатів експериментів для кожної точки тиску p_i робили не менше семи проб. Найменші і найбільші значення зафіксованих

показників не враховувалися при обробці експериментальних даних, в розрахунок бралися п'ять значень для кожної точки p_i. Таким чином, був сформований масив експериментальних даних на базі 150 експериментальних зразків (10 точок по тиску × 5 кратність повторення кожної точки по тиску × 3 види матеріалів).

Для забезпечення порівнянності отриманих експериментальних даних для всіх досліджуваних матеріалів і заданих точок тиску пресування був прийнятий однаковий початковий об’єм засипки. Схема вимірювання процесу ущільнення представлена на рис. 3.2а, б. Порція досліджуваної шихти завантажувалася в пресформу 3, розміщену на нижній траверсі 1 (столі) преса, з попередньо встановленим нижнім пуансоном 4, далі встановлювався верхній пуансон 5. На колоні преса 7, з'єднаної з рухомою нижньою траверсою 2, закріплений вимірювач усадки 6 зі шкалою. При підвищенні тиску пресування p_i від 0 МПа до заданої величини відбувається переміщення щупа вимірювача усадки 6 за зсувом пуансонов $H_{us.i}$ та після скидання тиску фіксується його кінцеве положення $H_{k.i}$ з точністю до 0,05 мм. Дана величина дозволяє визначити висоту $h_{0.i}$ брикету 8, що знаходиться в прессформі під тиском:

$$h_{0.i} = H_{0.i} - H_{k.i}\,, \qquad (3.1)$$

де, $H_{0.i}$ – положення щупа вимірювача для заданого тиску пресування при відсутності матеріалу в прессформі (рис. 3.2 а).

В роботі прийнято допущення, що елементи пресуючої оснастки є абсолютно жорсткими, тому діаметр $d_{0.i}$ брикету, що знаходиться під тиском в прессформе, дорівнює діаметру матричного каналу, в даному варіанті згідно з вимірами – 30,1 мм. Після вилучення брикетів з пресформи вимірювалися їх лінійні геометричні параметри – висота $h_{1.i}$, діаметр $d_{1.i}$ (точність до 0,05 мм) і маса $m_{br.i}$ (точність до 0,05 мм).

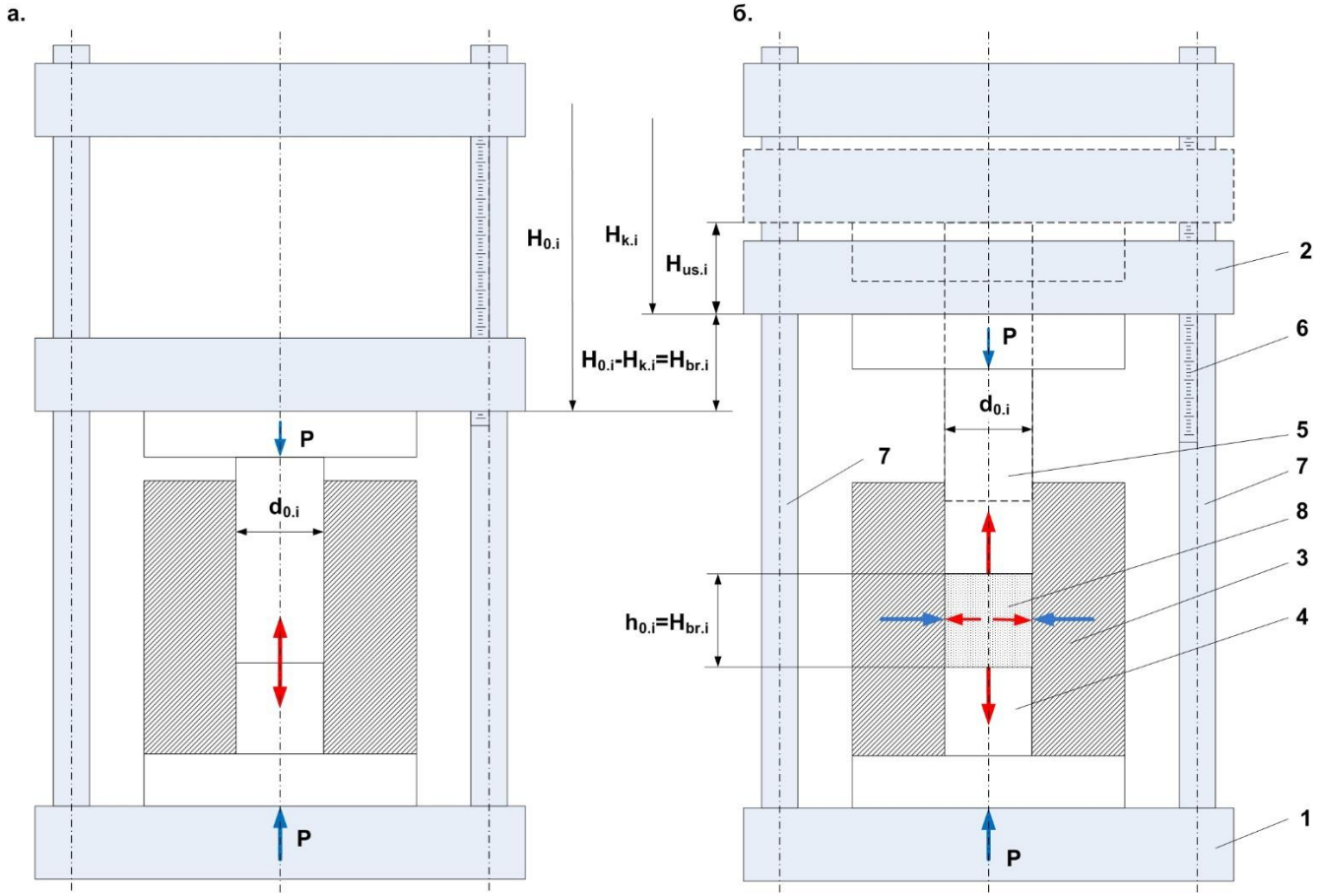


Рисунок 3.2 – Схема до визначення параметрів ущільнення матеріалу

а – пресове оснащення під навантаженням при відсутності матеріалу в пресформі; б – пресове оснащення в процесі ущільнення матеріалу 1 – траверса нижня; 2 – траверса верхня; 3 – пресформа; 4 – пуансон нижній; 5 – пуансон верхній; 6 – вимірювач усадки; 7 – колона преса; 8 –матеріал, що пресується

Значення об'єму брикету $V_{0.i}$, що знаходиться в прессформе під дією тиску пресування, та $V_{1.i}$ – після зняття тиску і вилучення з пресформи визначаються згідно виразів:

$$V_{0.i} = \frac{\pi \cdot {d_{0.i}}^2}{4} \cdot h_{0.i}\,, \tag{3.2}$$

$$V_{1.i} = \frac{\pi \cdot {d_{1.i}}^2}{4} \cdot h_{1.i}\,. \tag{3.3}$$

де $h_{0.i}$ та $d_{0.i}$ – висота та діаметр брикету, що знаходиться в пресформі під дією тиску пресування; $h_{0.i}$ та $d_{0.i}$ – висота та діаметр брикету після зняття тиску і вилучення з пресформи.

Для розрахунку параметрів ущільнення за експериментальними даними використовувалися такі вирази:
коефіцієнт ущільнення

$$Ky_i = \frac{\rho_{br.i}}{\rho_{nas}} = \frac{V_{nas}}{V_{0.i}} = \frac{m_{br.i} / \rho_{nas}}{(\pi \cdot {d_0}^2 / 4) \cdot h_{0.i}}; \tag{3.4}$$

величина пружної післядії

$$\delta_{V.i} = \frac{V_{1.i} - V_{0.i}}{V_{0.i}} \cdot 100\%, \tag{3.5}$$

Щільність брикету $\rho_{br.0.i}$ під тиском в пресформі та $\rho_{br.1.i}$ після вилучення з пресформи:

$$\rho_{br.0.i} = \frac{4 \cdot m_{br.i}}{\pi \cdot d_{0.i}^2 \cdot h_{0.i}}, \tag{3.6}$$

$$\rho_{br.1.i} = \frac{4 \cdot m_{br.i}}{\pi \cdot d_{1.i}^2 \cdot h_{1.i}}; \tag{3.7}$$

3.2.2. Встановлення графічних і аналітичних залежностей коефіцієнта ущільнення, пружної післядії та розущільнення від тиску пресування

В результаті проведених експериментів отримані дані згруповані в масив (табл. 3.2), на основі якого побудовані графічні залежності, представлені на рис. 3.3-3.5, і виконана їх апроксимація [173,174].

На рис. 3.3 представлені графічні залежності, апроксимовані рівняннями ступеневого типу, що описують функціональний взаємозв'язок $p=f(Ky)$ для досліджуваних матеріалів.

Лінії тренда дозволяють наочно уявити характер і відміну опору стисненню досліджуваних шихт. Рівняння апроксимації представлені на рис. 3.3. в подальшому будуть використані для розрахунку величини і поля розподілу напружень в формованому брикеті.

Відповідно до прийнятої в роботі концепції поля розподілу напружень, розраховані та побудовані з урахуванням властивостей шихти та конфігурації формуючих елементів, є основою для визначення величини і розподілу щільності, розущільнення та пружної післядії в брикеті.

На рис. 3.4 представлені графічні залежності, що характеризують зв'язок між пружною післядією $\delta_{V.i}$ та тиском пресування p_i.

Для торфу (рис. 3.4 а) крива залежності $\delta_V=f(p)$ з достатнім ступенем точності описується поліномом другого ступеня. Величина $\delta_{V.i}$ плавно зростає в інтервалі до 50 МПа. Згідно кривої $p=f(Ky)$, яка характеризує опір стисненню (рис. 3.3 а), в зазначеному інтервалі відбуваються процеси інтенсивного ущільнення торфу з переважанням структурних деформацій. Далі на ділянці від 50 МПа до 100 МПа значення $\delta_{V.i}$ зменшуються. Це можна пояснити характерними особливостями макроструктури частинок торфу, яка забезпечує їх хороше зчепленням в процесі ущільнення, що призводить до зменшення пружної і переважанню пластичної складової деформації в зазначеному інтервалі тисків пресування.

Таблиця 3.2 – Експериментальні дані

p_i,МПа	Ky_i	$\delta_{V.i}$, %	$\rho_{br.0.i}$, г/см^3	$\rho_{br.1.i}$, г/см^3	$\Delta\rho_{br..i}$, г/см^3
Торф					
10	1,99	31,21	0,79	0,60	0,19
20	2,31	33,22	0,91	0,68	0,23
30	2,53	35,09	1,00	0,74	0,26
40	2,65	35,28	1,05	0,78	0,27
50	2,83	34,93	1,12	0,83	0,29
60	3,00	37,13	1,19	0,87	0,32
70	3,03	34,72	1,20	0,89	0,31
80	3,29	33,04	1,31	0,98	0,32
90	3,45	31,50	1,37	1,04	0,33
100	3,57	32,54	1,42	1,07	0,35
Каолін					
10	1,82	12,62	1,66	1,47	0,19
20	1,89	13,60	1,72	1,52	0,21
30	1,99	15,03	1,82	1,58	0,24
40	2,09	19,72	1,91	1,60	0,31
50	2,14	20,90	1,95	1,61	0,34
60	2,15	19,96	1,96	1,63	0,33
70	2,21	22,22	2,02	1,65	0,37
80	2,21	21,96	2,02	1,66	0,36
90	2,28	23,80	2,08	1,68	0,40
100	2,32	26,21	2,11	1,67	0,44
Марганцевий концентрат					
10	1,91	9,17	2,08	1,90	0,17
20	2,07	10,72	2,26	2,04	0,22
30	2,13	10,10	2,32	2,11	0,21
40	2,20	11,85	2,40	2,15	0,25
50	2,25	12,34	2,45	2,18	0,27
60	2,30	13,55	2,51	2,21	0,30
70	2,40	12,43	2,52	2,24	0,28
80	2,47	14,95	2,59	2,26	0,34
90	2,47	12,97	2,59	2,30	0,30
100	2,44	13,34	2,66	2,34	0,31

Розвиток пружної післядії в каоліні (рис. 3.3 б) характеризується стабільним зростанням значень на всьому діапазоні тисків пресування від 10 до 100 МПа. При апроксимації взаємозв'язку $\delta_{V.i}$ та p_i для каоліну найбільша тіснота зв'язку досягається при використанні рівняння ступеневого типу.

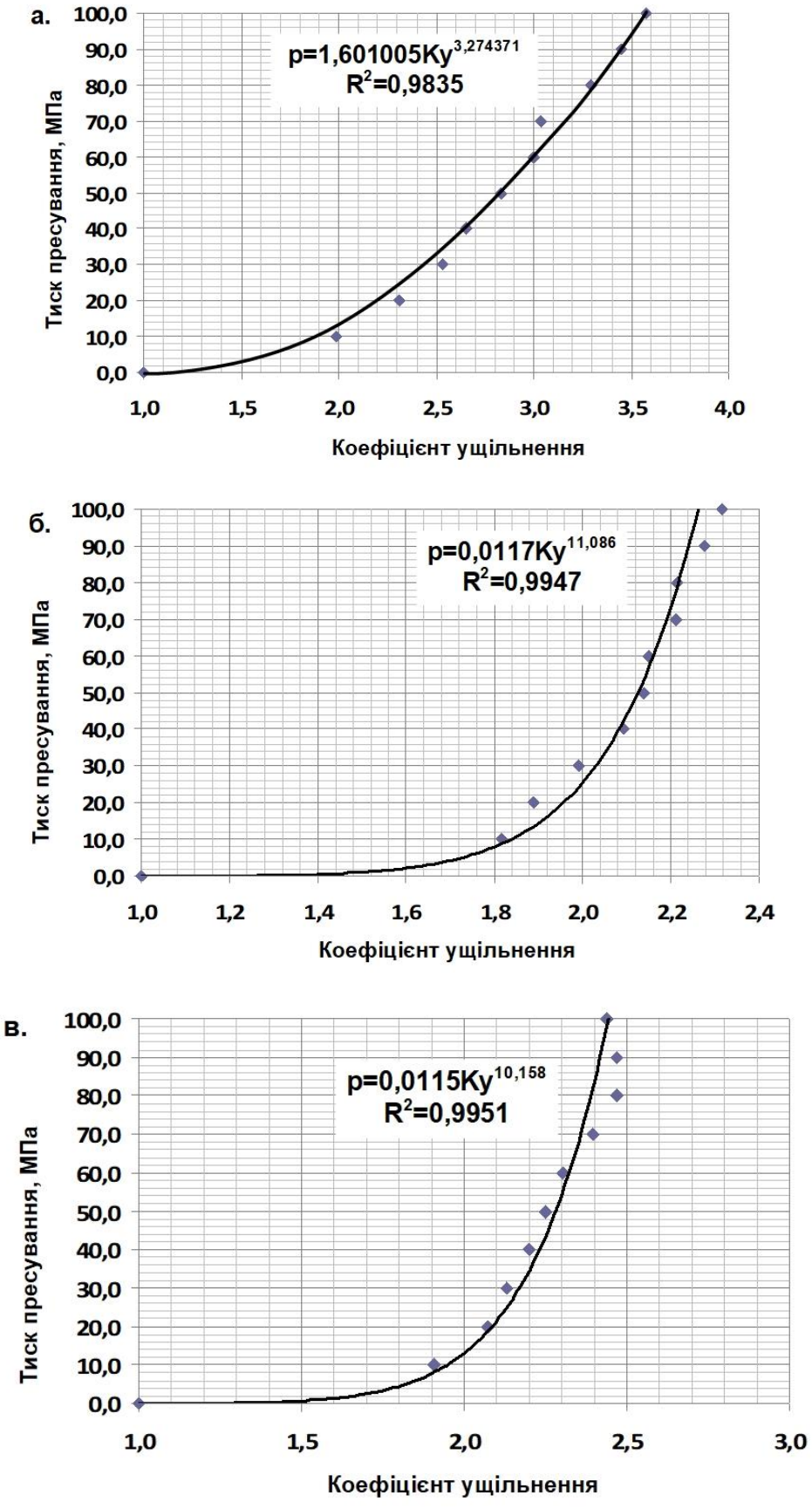


Рисунок 3.3 – Залежності коефіцієнта ущільнення від тиску пресування:
а – для торфу; б – для каоліну; в – для марганцевого концентрату

Монотонність зростання значення пружної післядії в пресовках з каоліну, ймовірно, обумовлена тим, що мікрочастинки каоліну, агломеровані в більші гранули, мають пластинчасту будову, невисоку твердість (2...2,5 за шкалою Мооса) і підвищену пластичність, що позитивно позначається на його здатності ущільнюватися. Руйнування конгломератів і частинок з ростом тиску пресування пов'язане з формуванням нових контактів, на яких виникають пружні залишкові деформації.

Розвиток пружної післядії в брикетах з марганцевого концентрату (рис. 3.3 в) аналогічно за характером, але істотно менше за абсолютною величиною, ніж в брикетах з каоліну. Це можна пояснити тим, що частинки марганцевого концентрату відрізняються більшою твердістю (табл. 3.1), менш схильні до руйнування, швидше досягають щільної упаковки, що в сукупності сприяє зниженню пружних деформацій.

Важливою характеристикою брикету, яка визначає його споживчі властивості, є щільність. Тому, доцільним видається використання отриманих експериментальних даних для оцінки впливу пружної післядії на величину кінцевої щільності брикетів (після зняття тиску пресування). Відповідно до експериментальних даних (табл. 3.2) побудовані графічні залежності (рис. 3.4), що відображають зв'язок $\rho_{br.0}=f(p)$ (крива 1) и $\rho_{br.1}=f(p)$ (крива 2). Криві ущільнення (рис. 3.4), які побудовані в координатах «тиск пресування - щільність», дають можливість оцінити вплив пружних (оборотних) і пластичних (необоротних) деформацій на кінцеву щільність брикету. Різниця щільності матеріалу під тиском в прессформе та після зняття тиску пресування – розущільнення:

$$\Delta\rho(p)=\rho_{br.0}(p)-\rho_{br.1}(p). \qquad (3.7)$$

може бути представлена як залежність $\Delta\rho_{br}=f(p)$ (рис. 3.6).

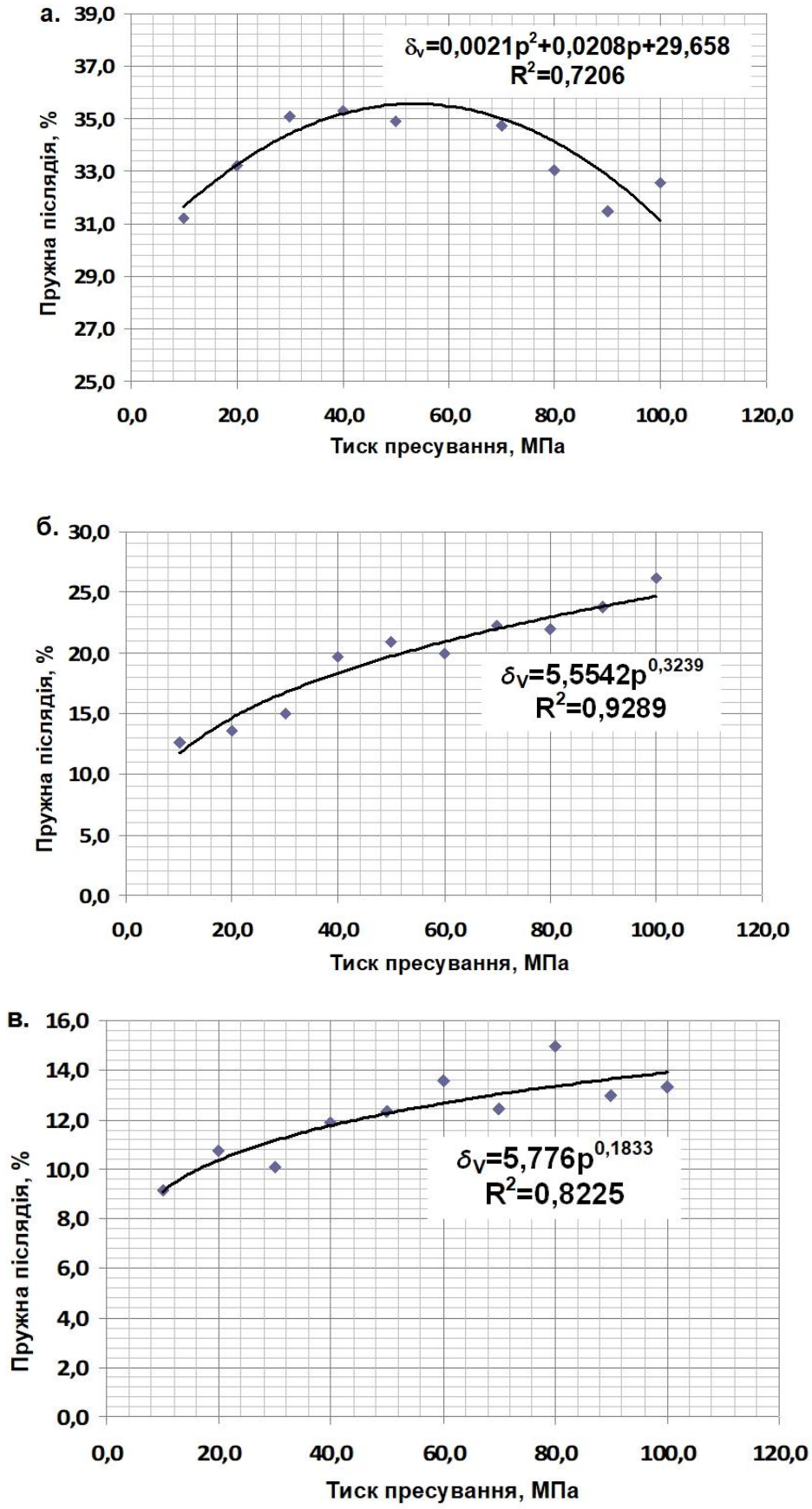


Рисунок 3.4 – Залежність пружної післядії від тиску пресування:
а – для торфу; б – для каоліну; в – для марганцевого концентрату

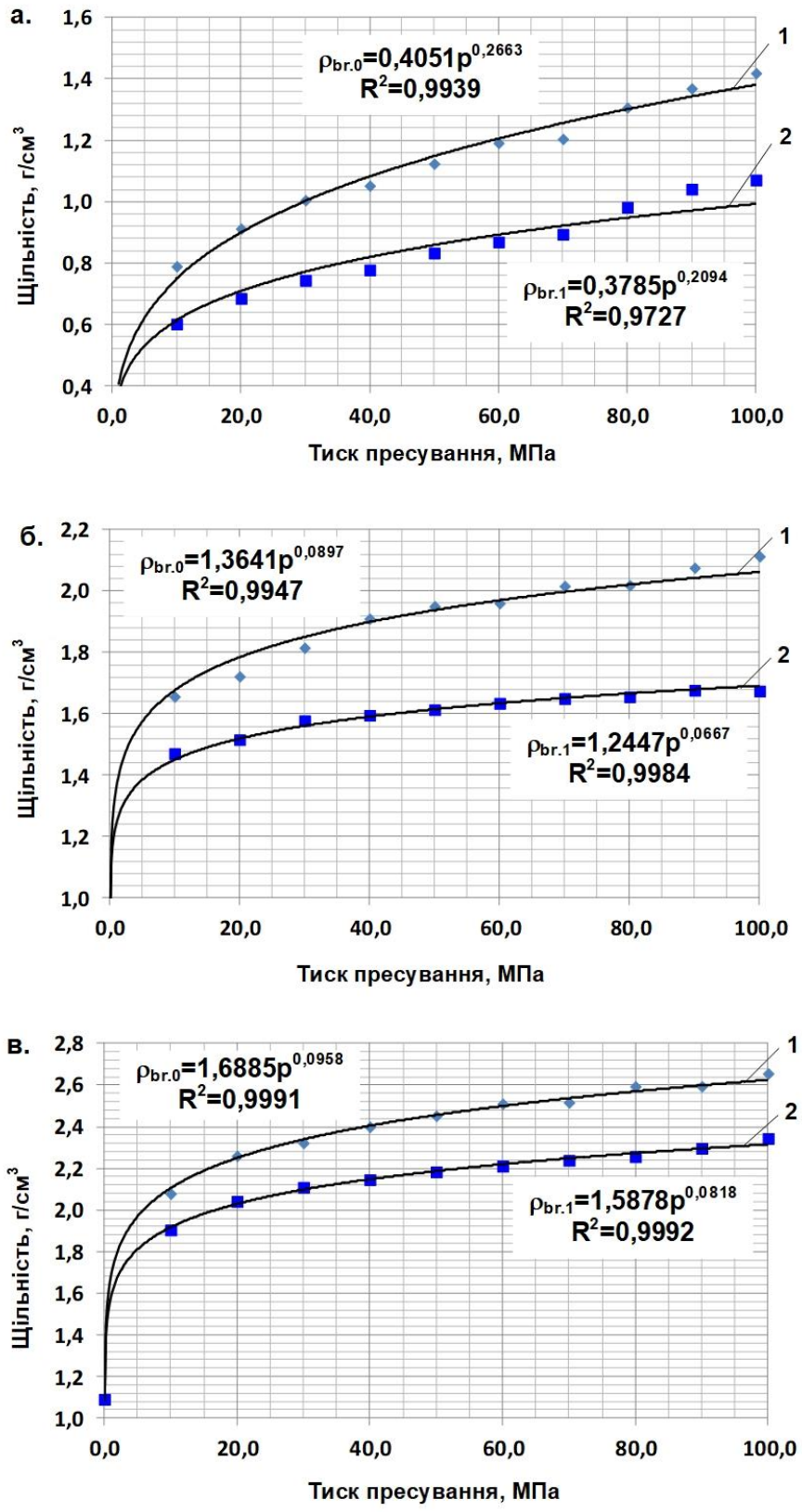


Рисунок 3.5 – Залежності щільності брикетів від тиску пресування:
а – для торфу; б – для каоліну; в – для марганцевого концентрату;
1 – під тиском пресформі; 2 – після вилучення з пресформи

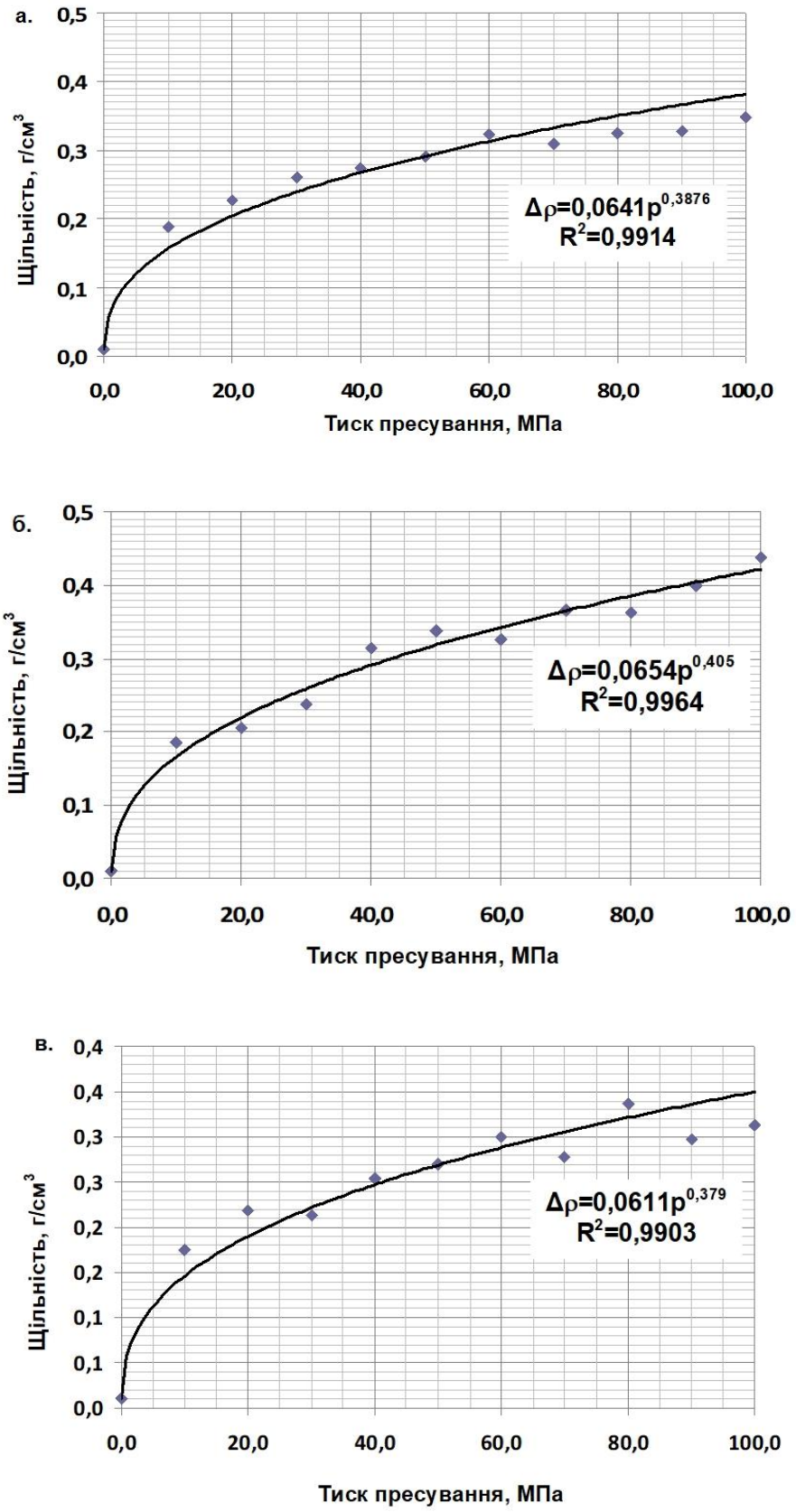


Рисунок 3.6 – Залежність розущільнення брикетів $\Delta\rho_i$ брикетів від тиску пресування: а – для торфу; б – для каоліну; в – для марганцевого концентрату

Представлені на рис. 3.3-3.5 в графічному і аналітичному вигляді залежності будуть використані при розробці розрахунково-аналітичного методу оцінки впливу зміни формуючих елементів на розвиток пружної післядії в брикетах.

3.3. Розрахунково-аналітичні дослідження зв'язків напружено-деформованого стану в брикетах з пружною післядією

3.3.1. Розробка методу оцінки впливу конфігурації формуючих елементів та параметрів ущільнення на пружну післядію

Ущільнення матеріалу в валковому пресі здійснюється в формуючих елементах зі складною криволінійною конфігурацією. Це призводить до посилення впливу зсувних деформацій на процес ущільнення. Геометрія формуючих елементів визначає нерівномірний розподіл нормальних σ_n та дотичних σ_t контактних напружень. Значна нерівномірність характеристик ущільнення (напруження та щільність), яка викликана впливом геометричних параметрів формуючих елементів, в поєднанні з пружним розширенням після зняття навантаження може привести не тільки до розущільнення брикетів, зниження міцності, але і до виникнення різного роду дефектів у вигляді тріщин і розшарувань. Щільність в обсязі брикету розподілена таким чином, що є яскраво виражені області переущільнення, що характеризуються наявністю макротріщин, в той же час центральна частина залишається пухкої не достатньо ущільненою. Все це негативно позначається на споживчих властивостях брикетів.

Для отримання брикетів необхідної щільності і міцності необхідно для пресованого матеріалу з урахуванням його властивостей вибрати раціональні геометричні параметри формуючих елементів, що забезпечують найменший негативний вплив нерівномірності розподілу ущільнення і пружної післядії в брикеті. Вирішення цього завдання вимагає створення нового методичного

підходу, заснованого на вивченні механізму ущільнення матеріалу в формуючих елементах зі складною криволінійною конфігурацією. Для розробки методу оцінки впливу геометричних параметрів формуючих елементів на величину і розподіл в брикеті пружного розширення запропонована концепція, що передбачає встановлення зв'язку напружено-деформованого стану з розподілом в брикеті щільності і пружної післядії на різних стадіях ущільнення. У раніше виконаних дослідженнях [76,77,82,87,133,135,136] показана можливість визначення щільності в різних перетинах брикету за допомогою полів напружень. Створено математичну модель, що дозволяє для будь-якої точки в обсязі брикету розрахувати величину напруження і відповідне значення щільності.

Це дозволило реалізувати поставлену в даному розділі роботи мету [175] – розробити метод оцінки впливу зміни формуючих елементів та параметрів ущільнення на пружну післядію, який заснований на встановленні зв'язків між полями розподілу напружень, пружним розширенням та щільністю.

На рис. 3.7 представлена структура методу, а на рис. 3.8 представлений алгоритм його реалізації [176].

Запропонований метод використовується для вирішення наступних завдань:

1. Прогнозування і оцінка впливу зміни формуючих елементів на параметри ущільнення і розвиток пружної післядії в брикетах.
2. Встановлення раціональних геометричних параметрів формуючих елементів, що забезпечують досягнення заданих параметрів ущільнення брикету.
3. Моделювання формуючих елементів з метою зниження негативного впливу пружного розширення на якість брикетів.

На першому етапі проводяться експериментально-аналітичні дослідження, в результаті яких встановлюються залежності $p=\sigma=f(Ky)$, $\delta V=f(\sigma)$, $\rho_1=f(\sigma)$, які характеризують опір стисненню та пружне розширення брикету після зняття навантаження рис. 3.3-3.5.



Рисунок 3.7 – Структура методу оцінки впливу зміни формуючих елементів на пружну післядію в брикетах

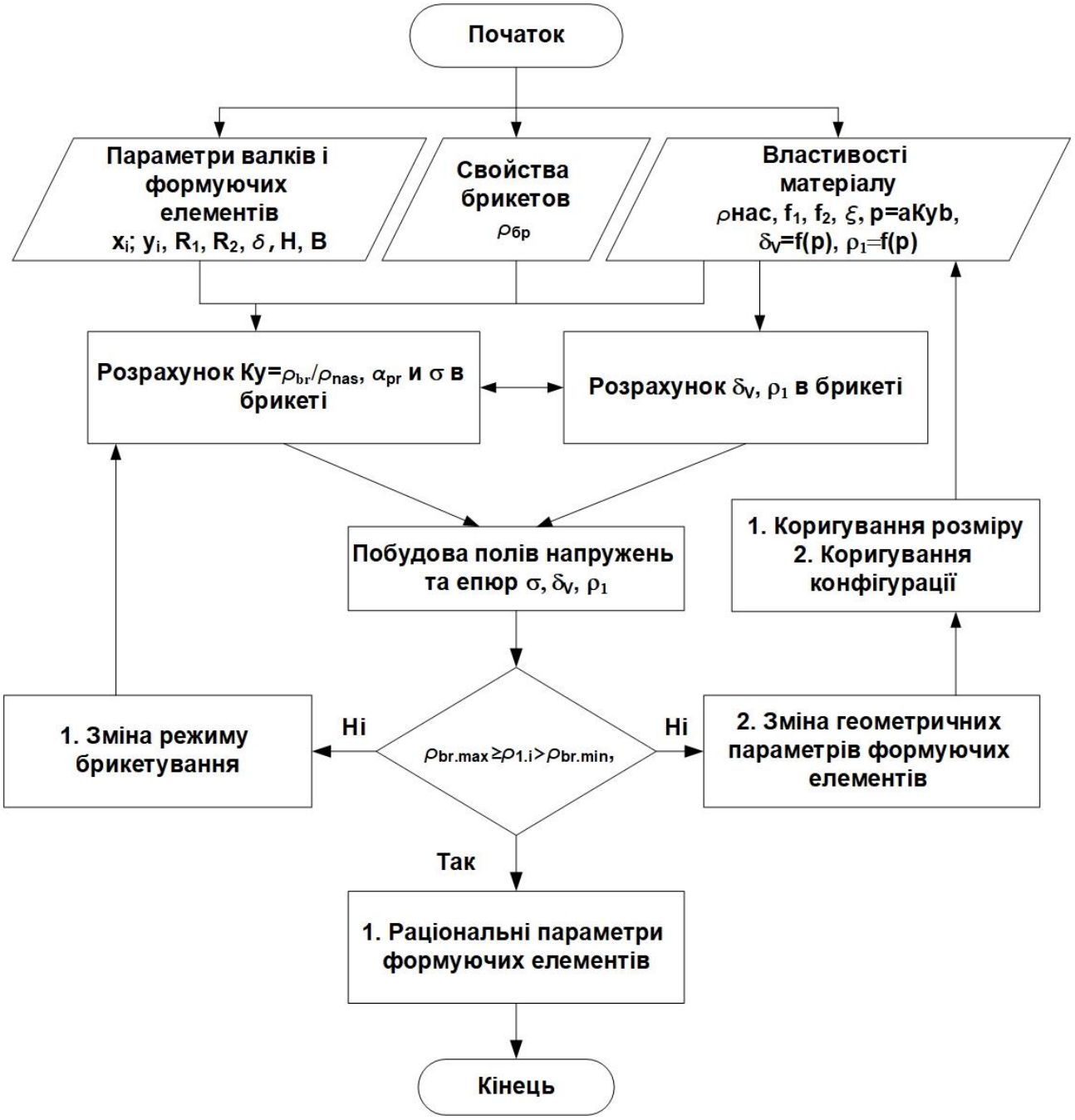


Рисунок 3.8 – Алгоритм реалізації методу оцінки впливу зміни формуючих елементів на пружну післядію в брикетах

x_i, y_i – координати контуру формуючого елемента; R_1, R_2 – радіуси валків; δ – зазор між валками; H – товщина формуючого елемента; B – наведена ширина формуючого елемента; ρ_{br} – задана щільність брикету; f_1, f_2, ξ – коефіцієнти зовнішнього і внутрішнього тертя, і бічного тиску, відповідно; Ky – коефіцієнт ущільнення; ρ_{bulk} – насипна щільність; α_{pr} – кут пресування; σ – напруження в матеріалі, що брикетується; $\rho_{br.max}$, $\rho_{br.min}$, $\rho_{1.i}$ – напруження в брикетуємом матеріалі

Використовуючи розрахунково-аналітичний апарат, створений при виконанні роботах [77,87,133], та експериментально встановлені залежності на другому етапі здійснюються розрахунково-аналітичні дослідження зв'язків конфігурації формуючих елементів з розподілом напружень, пружної післядії і розущільнення в брикетах, які подаються у вигляді епюр.

Для застосування розробленого методу сформовано розрахунково-аналітичний апарат і алгоритм для його реалізації програмними засобами.

Основні параметри досліджених в роботі формуючих елементів наведені в таблиці 3.3. Властивості матеріалів, що брикетуються та характеристики їх ущільнення представлені в розділі 3.2.

Таблиця 3.3 – Основні параметри формуючих елементів

Конфігурація	Тип	Розміри, мм	Об’єм, $см^3$
Зубчасто-жолобчаста	R14	32,0х30,0х15,0	10,0
	R17	40,0х38,5х18,5	19,0
	R24	63,6х60,0х27,0	50,0
Линзоподібна	L20	20,0х20,0х9,5	12,5
	L40	40,0х40,0х18,0	25,0
	L60	60,0х60,0х27,0	50,0

Принцип побудови епюр розглянуто на прикладі брикетування каоліну в формуючих елементах R14 (табл. 3.3).

Для зручності порівняння результатів для всіх досліджуваних матеріалів та конфігурацій формуючих елементів прийнята умова, що всі розрахунки виконуються для тиску пресування 100 МПа.

Використовуючи експериментально встановлену залежність $p=\sigma=f(Ky)$, описану рівнянням $\sigma=p=0{,}0117Ky^{11{,}086}$ (п. 3.2.2), обчислюються значення напруг в заданому перерізі брикету. На основі виконаних розрахунків здійснюється побудова поля розподілу напружень, що відображають напружено-деформований стан матеріалу, що ущільнюється.

Для розрахунку та побудови епюр напружень, пружного розширення та розущільнення в заданому перерізі обрані три лінії А, Б і В, в поздовжньому і

поперечному напрямках, в центрі і на периферії брикету (рис. 3.9). На лініях А, Б в залежності від розміру брикету виділяються 10...13 точок, на лінії В – 5 точок.

Для заданих ліній і обраних на них точках, використовуючи значення поля напружень і вирази $\sigma=p=0{,}0117Ky^{11{,}086}$, $\delta_V=5{,}5542\times p^{0{,}3239}$, $\rho_{br.1}=1{,}2447\times p^{0{,}0667}$ (п. 3.2.2), розраховуються і будуються епюри напружень, пружної післядії і щільності після пружного розширення.

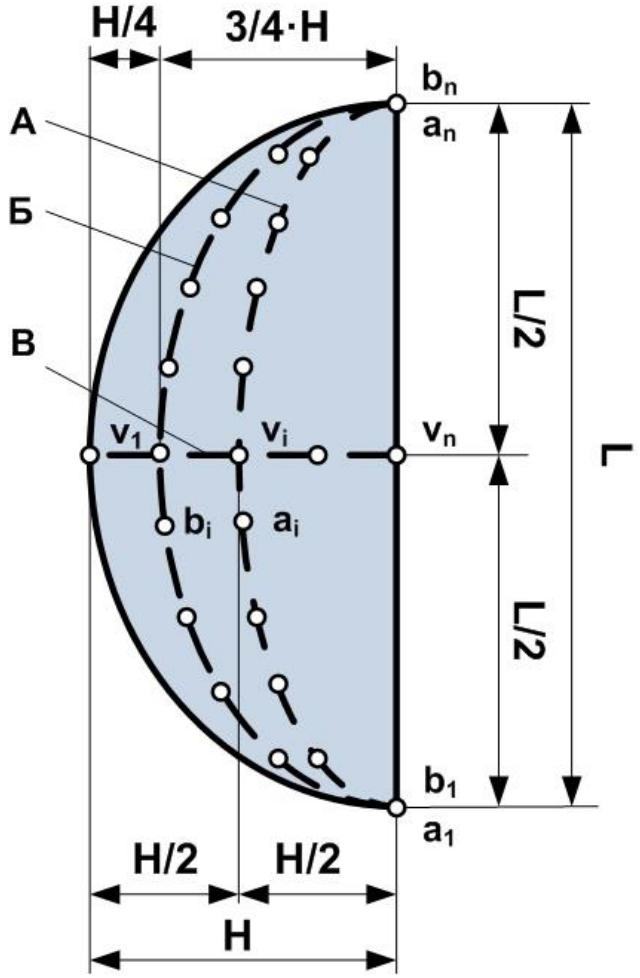


Рисунок 3.9 – Схема розташування ліній і точок для побудови епюр в брикеті

Для вирішення ряду завдань, пов'язаних з вибором раціонального типорозміру формуючих елементів, такі епюри побудовані для всіх прийнятих в роботі формуючих елементів і матеріалів (Додаток 1).

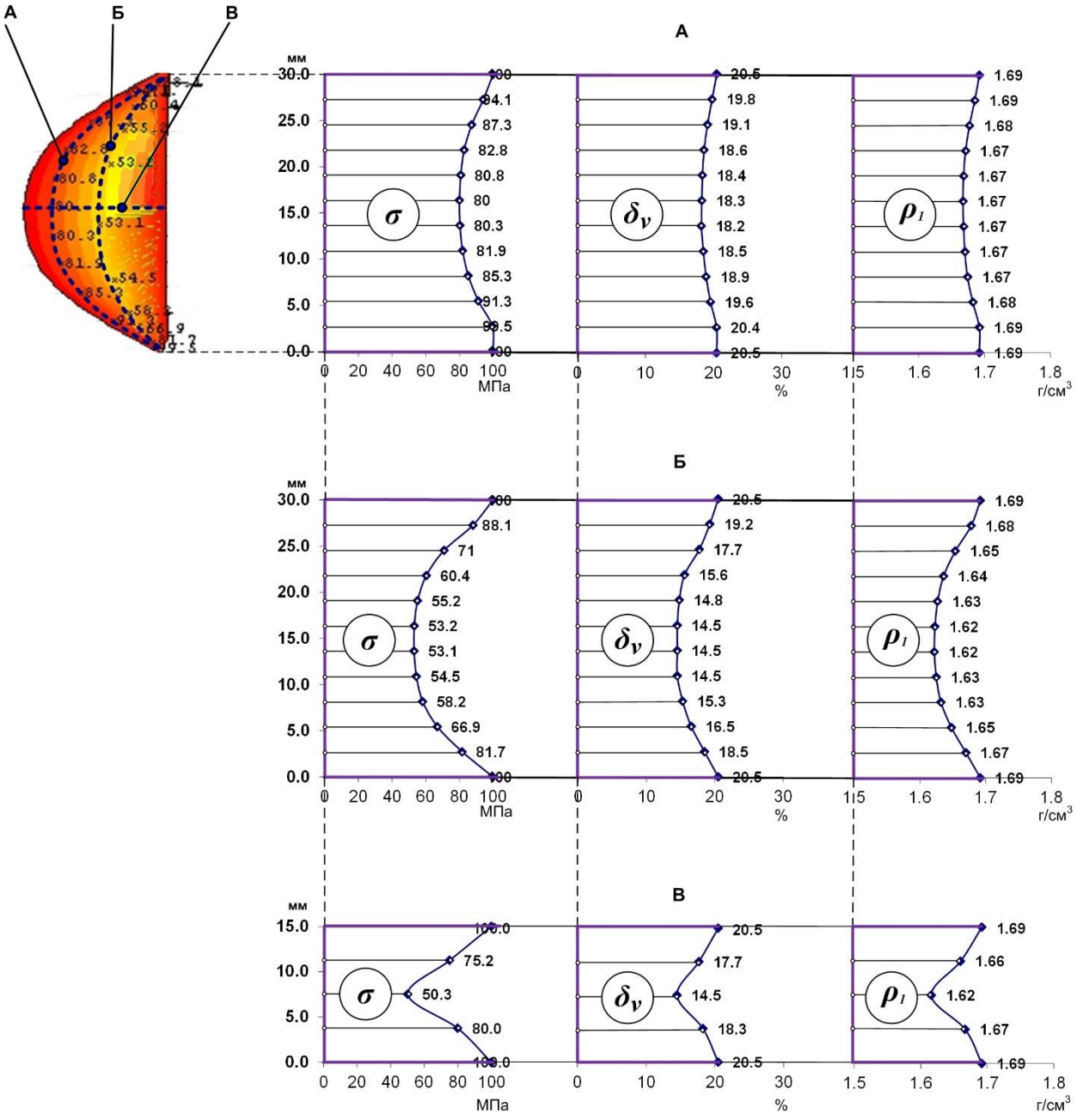


Рисунок 3.10 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів R14, матеріал - каолін (фр. -3 мм)

3.3.2. Застосування методу оцінки впливу конфігурації формуючих елементів на пружну післядію в брикетах до вирішення практичних завдань

Вибір раціональної конфігурації формуючих елементів.

Рішення завдання прогнозування і оцінки впливу формуючих елементів на параметри брикетування з урахуванням пружної післядії розглянемо на прикладі брикетування торфу.

На рис 3.11 і 3.12 представлені епюри, побудовані для формуючих елементів зубчасто-жолобчастої (R17) і лінзоподібної (L40) конфігурацій. Аналіз епюр показує, що для кожної з розглянутих конфігурацій характерна наявність в брикетах ділянок найменш ущільненого матеріалу, які розташовуються уздовж лінії Б в центральній частині брикету. Величина напружень на цих ділянках становить 42 ... 48 МПа, пружна післядія – ≈ 36%, щільність після зняття навантаження – ≈0,8…0,9 г/см^3. Слід зазначити, що, незважаючи на близькі за величиною значення вказаних параметрів, вплив зміни проявляється в розмірах і розташуванні вказаних ділянок.

У лінзоподібних брикетах лінія Б, вздовж якої розташована розущільнена ділянка, лежить в площині поєднання напівформ (рис. 3.12). Це сприяє тому, що в процесі пружного розширення брикету уздовж лінії Б розвивається чистий зсув шарів матеріалу, що при певних значеннях пружних деформацій призводить до виникнення тріщин. Розвиток таких дефектів сприяє розшарування брикетів по лінії сполучення напівформ (рис. 3.13).

Для брикетів, отриманих в зубчасто-жолобчастих формуючих елементах, найменш ущільнена ділянка витягнута уздовж лінії Б, яка в даному випадку має істотну кривизну, що перешкоджає розвитку чистого зсуву між шарами матеріалу, утворення тріщин і розшарування брикетів.

Таким чином, для зазначених умов брикетування торфу більш кращою є зубчасто-жолобчаста конфігурація робочої поверхні валків.

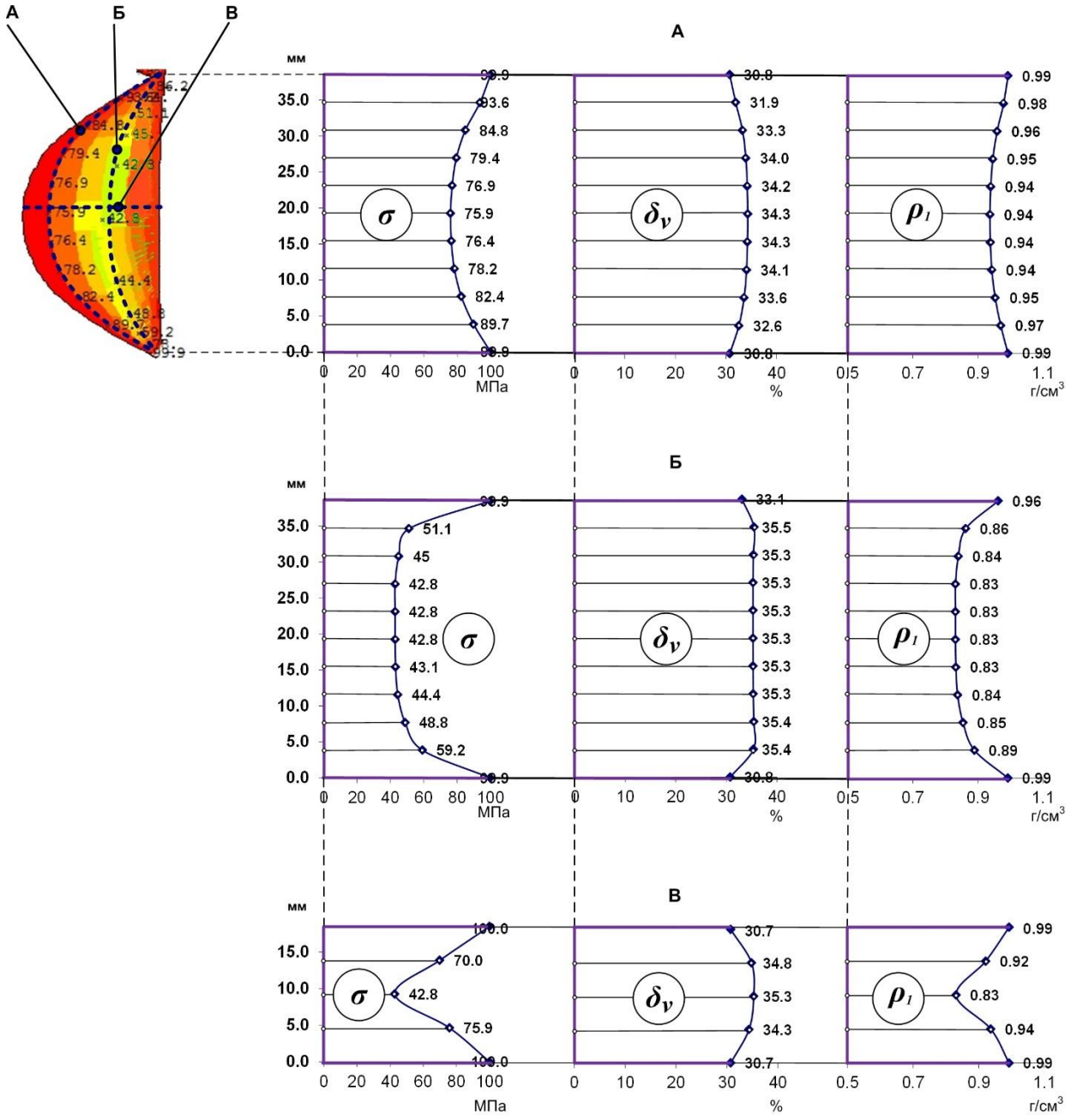


Рисунок 3.11 – Епюри розподілу напружень, пружної післядії і щільності для зучасто-жолобчастої конфігурації формуючих елементів R17, матеріал - торф (фр. -3 мм)

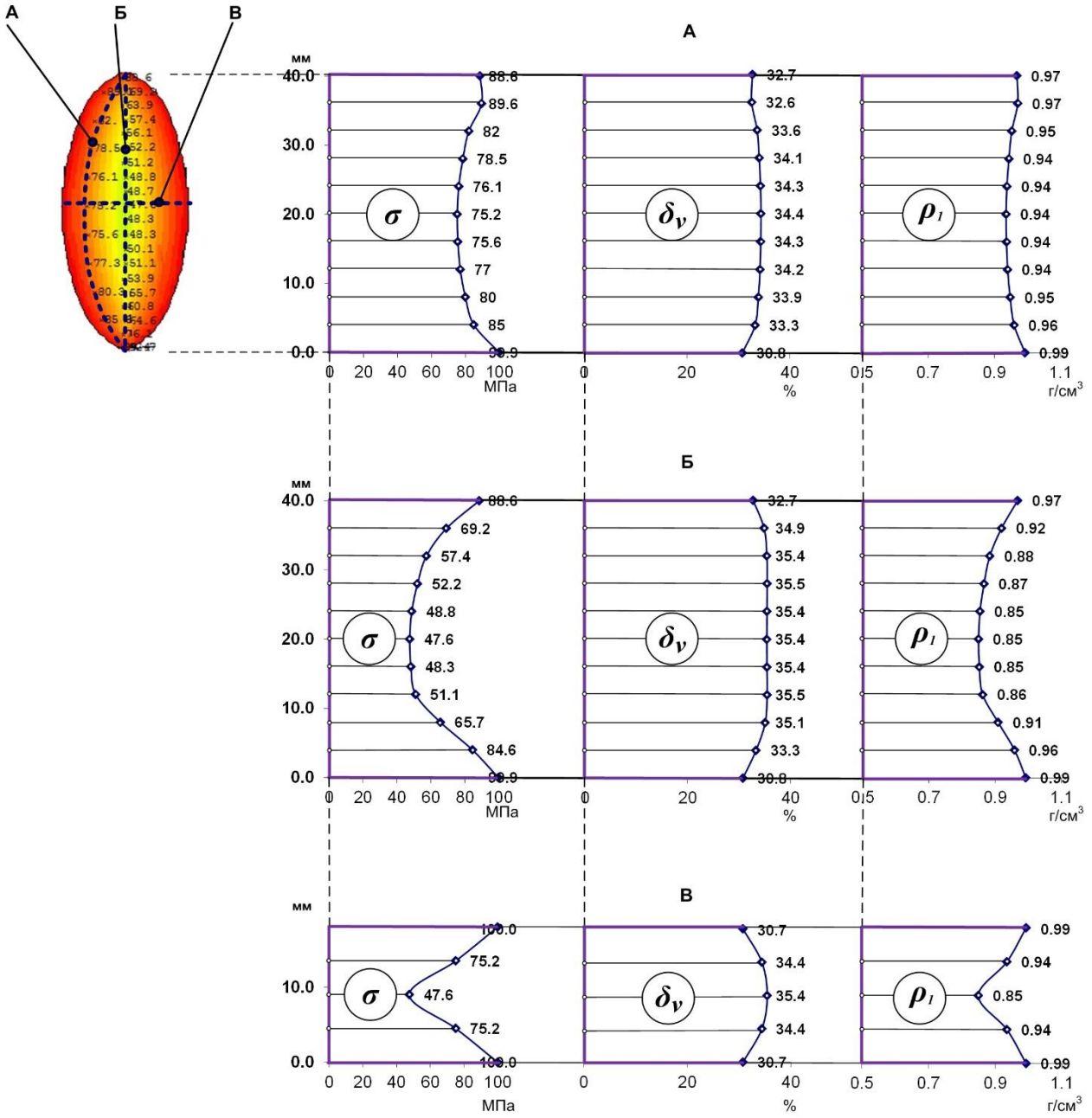


Рисунок 3.12 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії і щільності для лінзоподібної конфігурації формуючих елементів L40, матеріал – торф (фр. -3 мм)



Рисунок 3.13 – Дефекти в брикетах з торфу

Щоб оцінити вплив зміни формуючих елементів для матеріалів з різними фізико-механічними властивостями, аналогічні розрахунково-аналітичні дослідження проведені для брикетування каоліну і марганцевого концентрату. Епюри для цих матеріалів представлені на рис. 4, 7, 10, 13 в Додатку 1.

Основною відмінністю каоліну і марганцевого концентрату є зниження величини пружної післядії в порівнянні з торфом: при 100 МПа для торфу δ_V=32,5%, для каоліна δ_V=26,2%, для марганцевого концентрату δ_V=13,3% (табл. 3.9). Аналіз побудованих для розглянутих конфігурацій R17 и L40 епюр показує, що пружна післядія в брикетах з торфу збільшується від периферії до центру: R17 и L40– с 30% до 35%, на всіх досліджуваних лініях А, Б, В, а в брикетах з каоліну і марганцевого концентрату пружна післядія в центральній області знижується: у каоліну R14 – з 20,5% до 14%, L40 – з 20,6% до 19,4%, у марганцевого концентрату R14 – з 13,6% до 12,3%, L40 – з 13% до 11,7%. Тому в брикетах з цих матеріалів, отриманих в формуючих елементах лінзоподібної конфігурації, не спостерігається розвиток тріщин і їх розшарування. Виконана прогнозна оцінка показує, що для цих матеріалів при певних параметрах ущільнення можливе використання як зубчасто-жолобчастої, так і лінзоподібної конфігурації.

Як показує практичний досвід брикетування і виконані експериментальні та розрахунково-аналітичні дослідження, характер впливу пружної післядії на щільність і міцність брикету залежить не тільки від конфігурації формуючого

елемента, але і від його геометричних параметрів і їх співвідношень. Для остаточного вибору раціонального типорозміру формуючих елементів слід оцінити вплив їх розмірів на показники ущільнення і пружного розширення брикетів.

Визначення раціональних розмірів формуючих елементів.

Для вирішення завдання визначення раціональних геометричних параметрів формуючих елементів побудовані епюри розподілу напружень, пружного розширення та щільності після зняття навантаження для 3-х типорозмірів зубчасто-жолобчастої конфігурації R14, R17, R24 та 3-х типорозмірів лінзоподібної конфігурації L20, L40, L60 (табл. 3.8) для досліджуваних матеріалів – торфу, каоліну і марганцевого концентрату (Додаток 1). Порівняльний аналіз епюр дозволяє оцінити вплив розмірів формуючих елементів на параметри ущільнення і пружне розширення.

Розглядаючи епюри, побудовані для умов брикетування торфу, слід зазначити, що як для зубчасто-жолобчастої, так і лінзоподібної конфігурації збільшення розмірів формуючих елементів призводить до формування брикетів з більш пухкою серцевиною. Так, при зміні діаметра лінзи – 20мм, 40мм, 60мм, щільність в центрі брикету зменшується – 0,92 г/см^3, 0,85 г/см^3, 0,79 г/см^3 відповідно. Аналогічна картина спостерігається при збільшенні розмірів формуючих елементів зубчасто-жолобчастої конфігурації – R14, R17, R24, щільність в серцевині становить 0,86 г/см^3, 0,83г/см^3, 0,71 г/см^3 відповідно. При цьому при використанні формуючих елементів R24 та L60 значно зростає обсяг області, що займає недоущільнений матеріал (рис. 3.15, 2 Додаток 1). Збільшення розмірів сприяє зростанню нерівномірності розподілу пружної післядії і щільності в брикетах, збільшується різниця значень щільності на периферії і в центрі брикету, більшою мірою це проявляється при використанні зубчасто-жолобчастої конфігурації R24 – значення $\rho_{br.1}$ в центрі становить 0,71 г/см^3, а на периферії – 0,99 г/см^3. Таким чином, застосування формуючих елементів R24, L60 і подальше збільшення їх розмірів при брикетуванні торфу неприпустимо. Порівняльний аналіз епюр свідчить, що найбільш переважними є формуючі

елементи R14 и L20. Причому в формуючому елементі L20 обсяг рихлої серцевини незначний. Отже, практично усувається небезпека розшарування брикетів по лінії сполучення напівформ.

Аналіз епюр, побудованих для каоліну і марганцевого концентрату (рис. 3-8 Додаток 1) показує, що при зміні параметрів, що характеризують пружні властивості матеріалу, змінюється ступінь впливу розмірів формуючих елементів на розподіл параметрів ущільнення. Зменшення δ_V каоліна до 26,21% в порівнянні з торфом (δ_V = 35,5%) створює рівноцінні умови застосування конфігурацій R14 і R17 (щільність в центрі становить 1,62 г/см^3 та 1,60 г/см^3, відповідно), L20 та L40 (щільність в центрі – 1,65 г/см^3 и 1,61 г/см^3). При брикетуванні каоліну формуючими елементами R24 та L60 (рис. 5, 8 Додаток 1) значно зростає (до половини об'єму брикету) ділянку рихлого недоущільненого матеріалу. Щільність матеріалу на цій ділянці становить 1,56…1,57 г/см^3, що відповідає стану матеріалу зі слабкою зв'язністю. Як і для торфу, для каоліну застосування формуючих елементів L60 і R24 не рекомендується.

У марганцевому концентраті пружні властивості у всьому діапазоні досліджуваного тиску (10…100 МПа) проявляються в меншому ступені, ніж у торфу і каоліну (δ_V = 13,9%) (см. розділ 3.2).

Аналіз епюр для марганцевого концентрату показує, що для умов брикетування марганцевого концентрату збільшення розмірів формуючих елементів не робить істотного впливу на характер розподілу щільності і якість брикетів, але при виборі конфігурації L60 і R24 слід враховувати значне збільшення параметрів ущільнення в клиноподібних ділянках. Для цих конфігурації щільність зростає від 2,09…2,11 г/см^3 в серцевині, до 2,31 г/см^3 в клиноподібної області. Переущільнення матеріалу може привести до утворення локальних тріщин, але при цьому не порушується цілісність брикетів. Зазначений недолік можна усунути, коректуючи силові характеристики процесу ущільнення.

В результаті виконаних розрахунково-аналітичних досліджень показана можливість застосування створеного в роботі методу для вибору раціональних типорозмірів формуючих елементів, які мінімізують негативний вплив пружної післядії на якість брикетів, з урахуванням властивостей матеріалів.

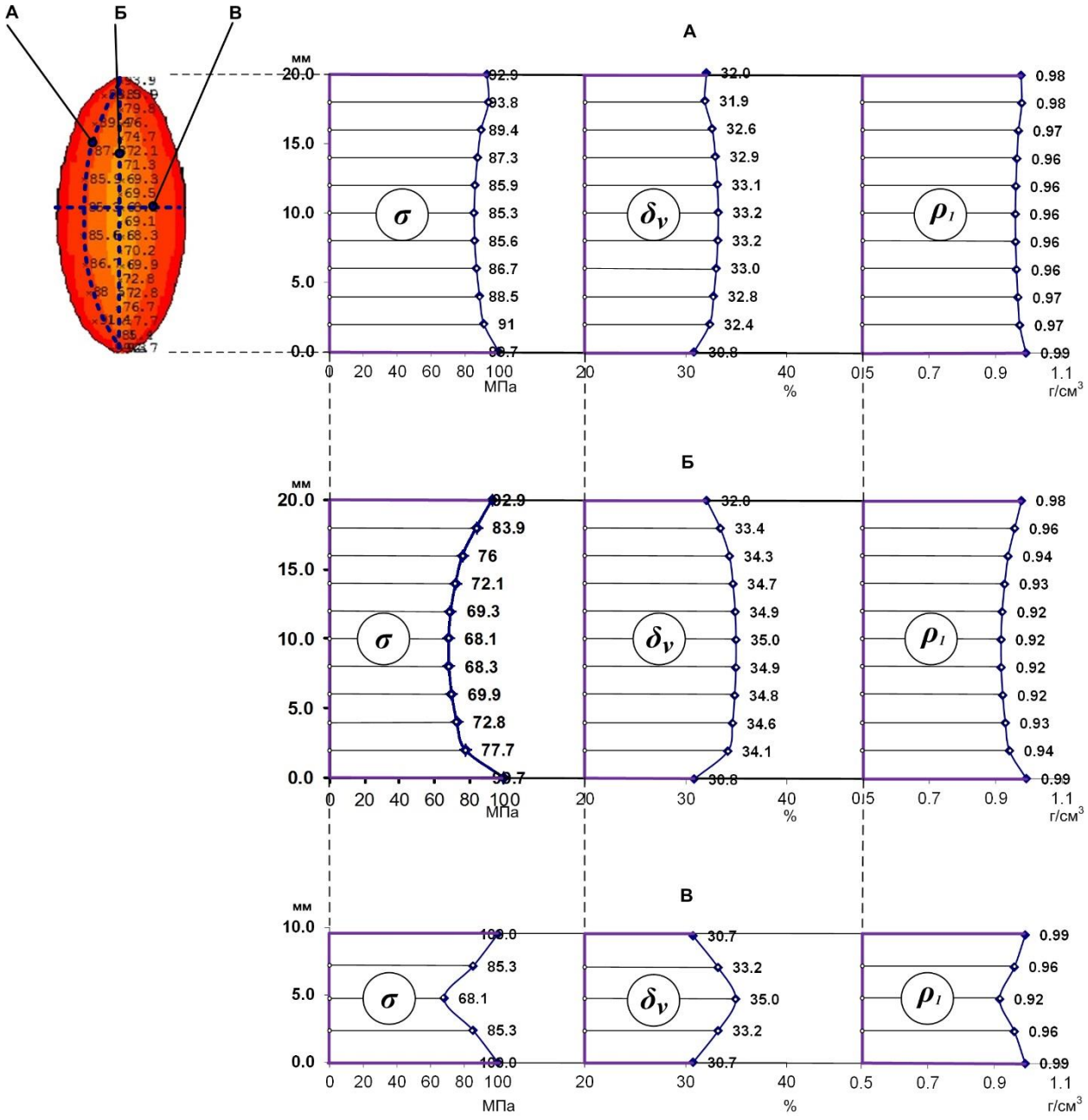


Рисунок 3.14 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів L20, матеріал – торф (фр. -3 мм)

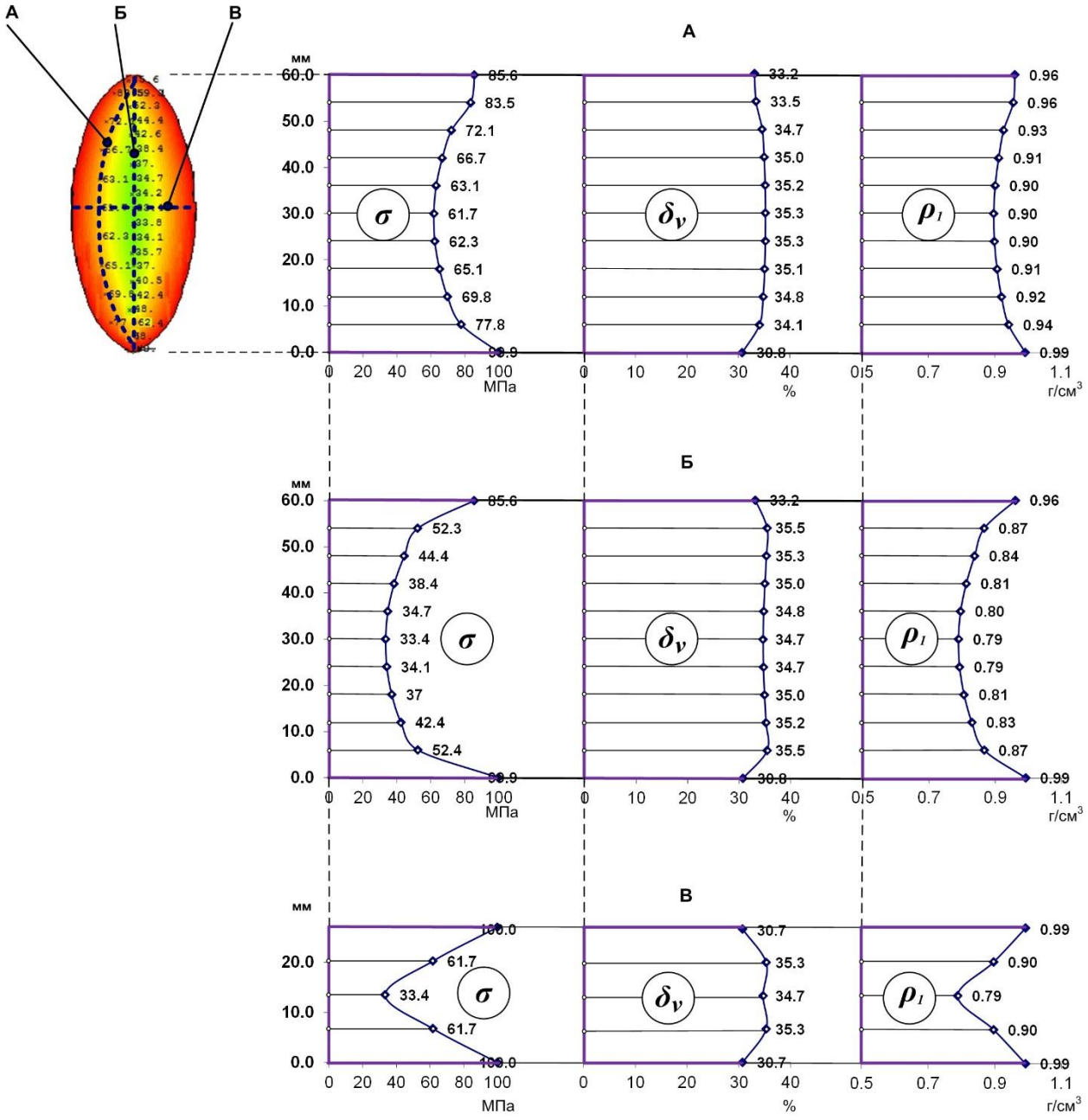


Рисунок 3.15 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів L60, матеріал – торф (фр. -3 мм)

Розробка нової модифікації формуючого елемента.

Результати проведених розрахунково-аналітичних досліджень показують, що застосування як зубчасто-жолобчастої, так і лінзоподібної конфігурації не забезпечує повне усунення негативного впливу пружної післядії на якісні характеристики брикетів, а при певних умовах навіть посилює її вплив на зниження міцності брикетів. У той же час, кожна з досліджуваних конфігурацій має свої позитивні сторони, що дозволяють знизити наслідки впливу пружного розширення.

Так, зубчасто-жолобчастим формуючим елементам притаманні нерівномірність розподілу пружної післядії і щільності. Утворення ділянок з недостатньо ущільненим матеріалом може привести до істотного зниження міцності та утворення дефектів, особливо зі збільшенням габаритних розмірів формуючих елементів. Лінзоподібні формуючі елементи, в силу меншої кривизни поверхонь, дозволяють досягти більш рівномірного ущільнення. Однак вони мають істотний недолік. Найменш ущільнена ділянка матеріалу в брикетах лінзоподібної форми витягнута уздовж лінії, що лежить в площині поєднання напівформ. Пружне розширення після зняття навантаження і розвиток залишкових деформацій у вигляді чистого зсуву призводить до порушення цілісності брикету по лінії сполучення напівформ, що підтверджується експериментальними дослідженнями та практикою брикетування. У зубчасто-жолобчастих формуючих елементах ділянка найменш ущільненого матеріалу не зорієнтована по лінії, що перешкоджає розвитку чистого зсуву та умов для розшарування брикетів при пружному розширенні.

Для усунення зазначених недоліків та використання зазначених переваг досліджуваних формуючих елементів запропонована їх модифікація, конфігурація і геометричні параметри якої представлені на рис. 3.16 [177, 178].

У запропонованому формуючому елементі зберігаються умови формування брикету в закритому калібрі, утвореному коміркою на одному валку та жолобом на іншому, при цьому конфігурація комірки наближена до геометрії лінзовидного формуючого елемента.

а б

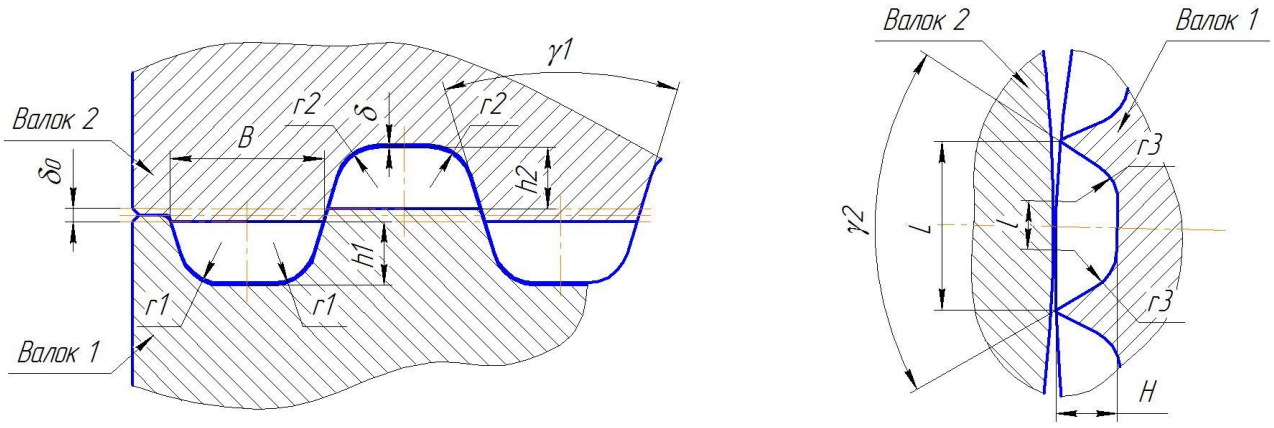


Рисунок 3.16 – Формуючий елемент, створений на основі зубчато-жолобчастої та лінзоподібної конфігурацій; а – повздовжній перетин; б – поперечний перетин

1. Тип – LR15; L=39,7 мм; B=36,6 мм; H=14,5 мм; h1=14,5 мм; r1, r2, r3=10 мм; $\gamma 1$=34,3°; $\gamma 2$=62,0°

2. Тип – LR12; L=40,6 мм; B=36,6 мм; H=12,5 мм; h1=12,5 мм; r1, r2, r3=10 мм; $\gamma 1$=34,3°; $\gamma 2$=62,0°

3. Тип – LR12M; L=40,6 мм; B=36,5 мм; H=12,5 мм; h1=12,5 мм; r1, r2, r3=10 мм; $\gamma 1$=30,0°; $\gamma 2$=36,5°

Для модифікацій формуючих елементів LR15, LR12 і LR12M виконані розрахунки і побудовані епюри параметрів ущільнення і пружного розширення (див. рис. 3.17-3.19 і рис. 14, 15 Додаток 1).

На рис. 3.11-3.13 представлені епюри для брикетування торфу формуючими елементами LR15, LR12 і LR12M. Габаритні розміри даних формуючих елементів близькі до R17 і L40 (39…41 мм). Порівняльний аналіз з формуючими елементами типу R17 показує, що нерівномірність розподілу пружної післядії, напружень та щільності зменшилася. Пружна післядія і щільність в брикетах, отриманих в формуючих елементах LR15 LR12 і LR12M, мають однакові значення уздовж ліній А і Б, за винятком невеликих клиновидних ділянок на периферії.

Зменшення глибини *H* в формуючих елементах LR12 и LR12M дозволило зменшити перепад значень щільності в центрі – 0,88 г/см^3 та периферії – 0,99

г/см^3 , причому в центральній частині брикету щільність брикету зросла з 0,85 г/см^3 (формуючий елемент LM15) до 0,88 г/см^3.

Аналогічні розрахунки і побудова епюр були виконані для брикетування каоліну і марганцевого концентрату (див. Рис. 15, 16 додаток 1). Аналіз епюр показує, що при застосуванні нової модифікації формуючого елемента вдалося зменшити різницю значень параметрів ущільнення по перетину брикету.

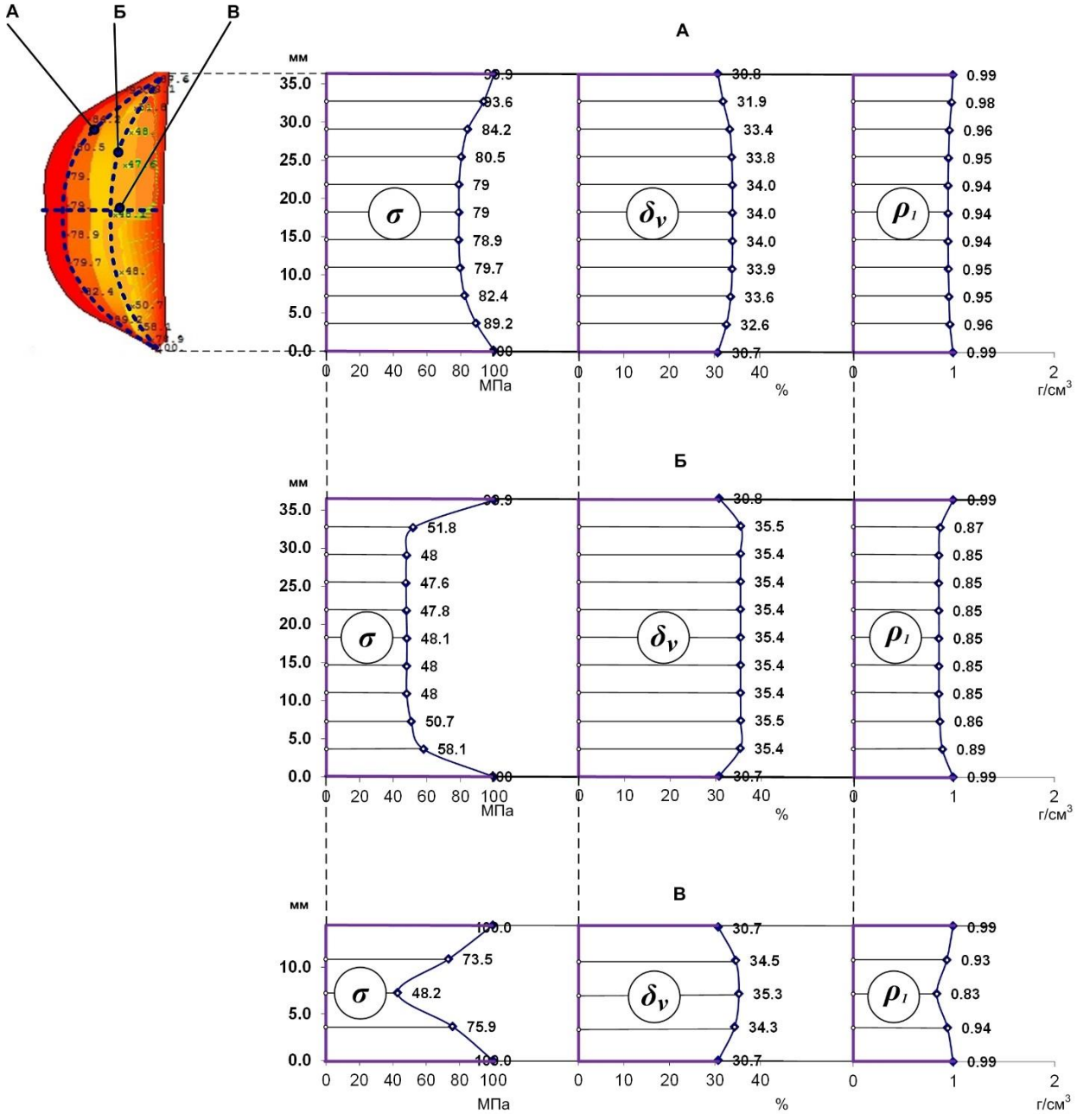


Рисунок 3.17 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів LR15, матеріал – торф (фр. -3 мм)

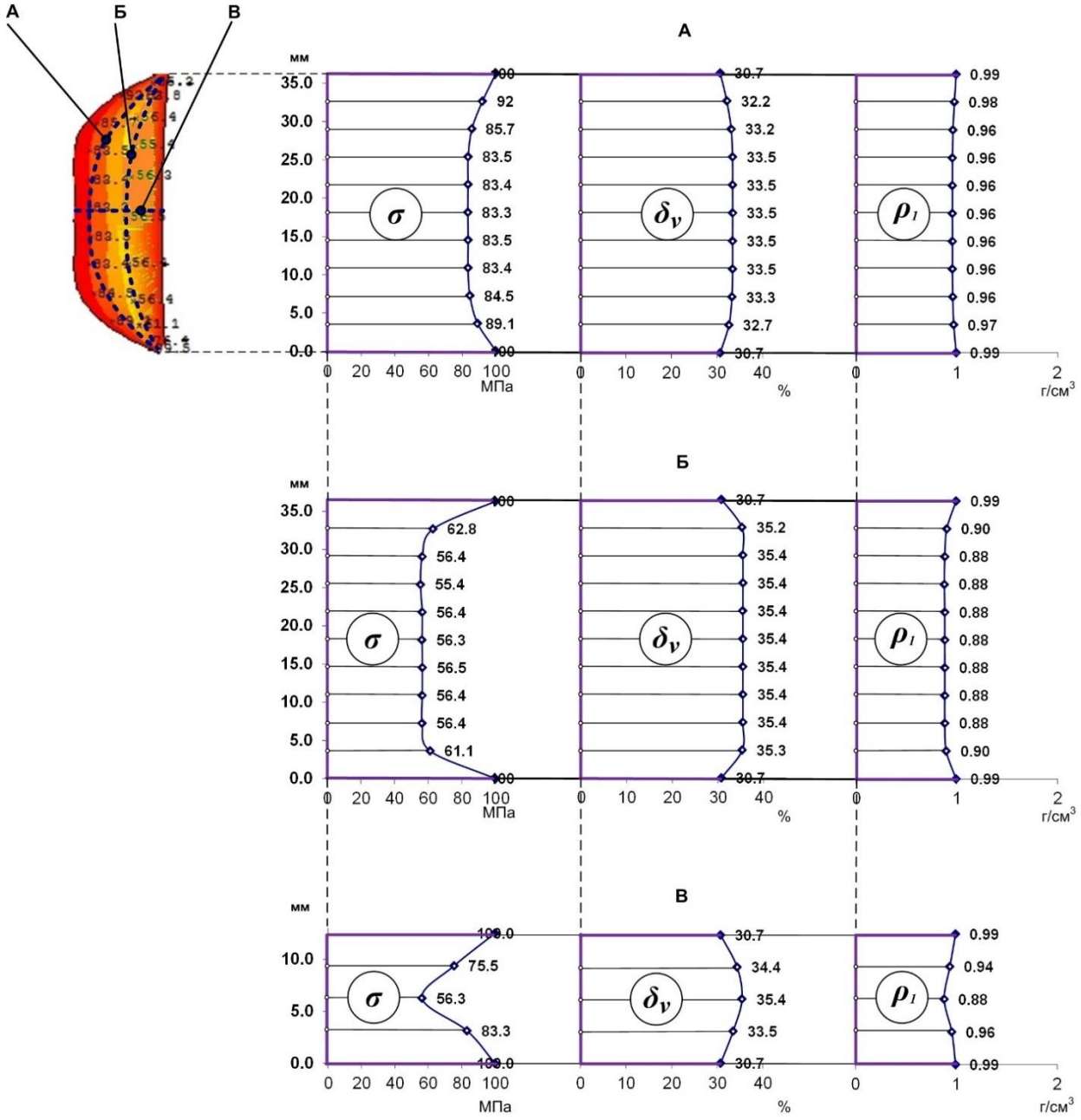


Рисунок 3.18 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів LR12, матеріал – торф (фр. -3 мм)

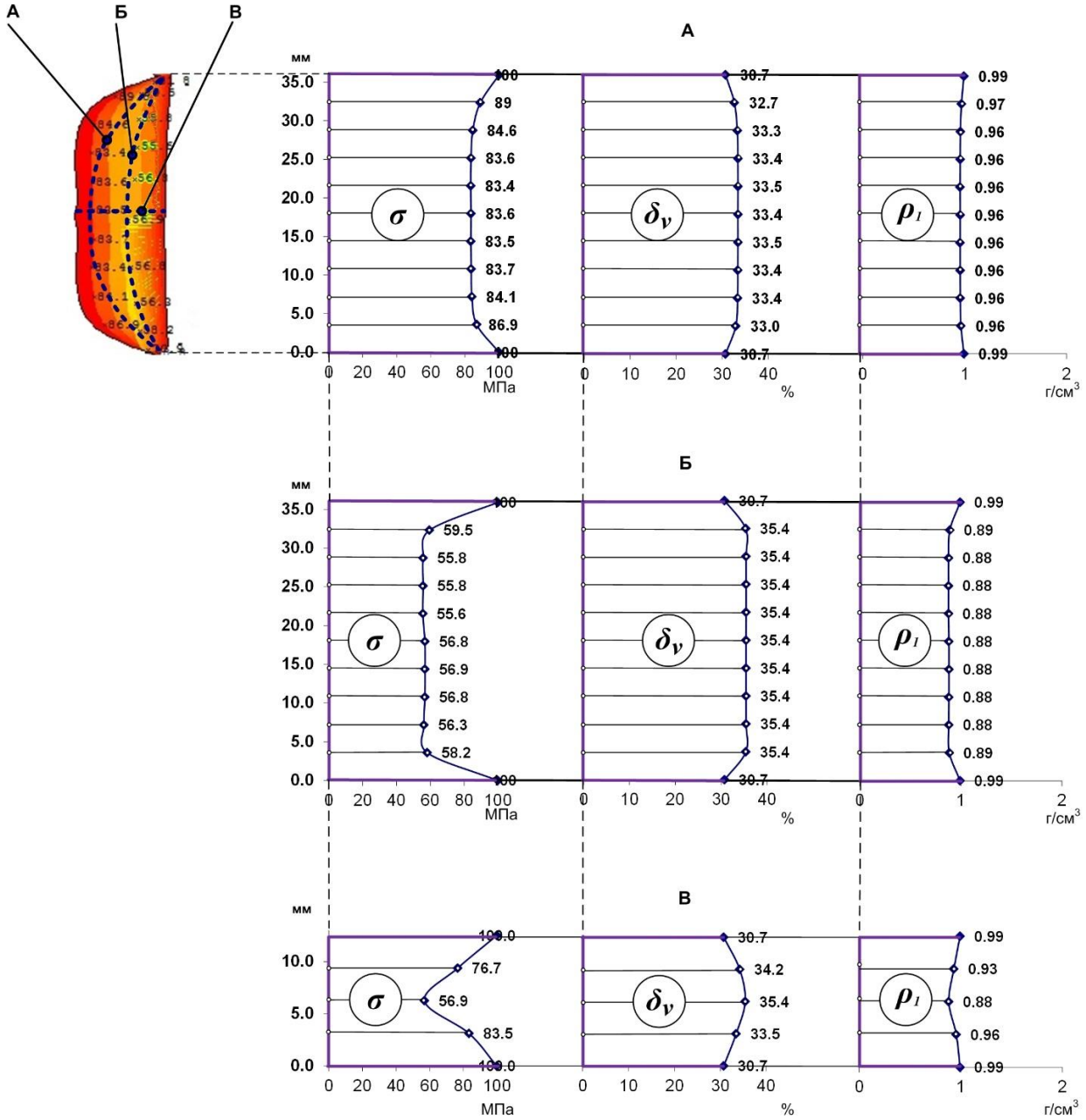


Рисунок 3.19 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів LR12M, матеріал – торф (фр. -3 мм)

Так, при брикетуванні каоліну діапазон значень пружної післядії для формуючих елементів LR15 звузився (19,4…24,7%) у порівнянні з R17 (18,7…24,7%). При цьому розподіл пружної післядії і щільності уздовж лінії А

можна вважати рівномірним, на лінії Б нерівномірність спостерігається тільки на малих ділянки по краях брикету. Така ж картина спостерігається при брикетуванні марганцевого концентрату формуючим елементами LR15.

Порівняльний аналіз епюр для нових конфігурацій формуючих елементів дозволяє зробити висновок про позитивні результати його застосування для матеріалів з різними фізико-механічними властивостями.

Розглянуті варіанти вирішення завдань для різних типорозмірів конфігурацій формуючих елементів для трьох досліджуваних матеріалів показують, що існує реальна можливість застосування запропонованого в роботі методу, як складової частини комплексного апарату по оптимізації вибору формуючих елементів валкових пресів для забезпечення ефективності процесу формування брикетів і досягнення необхідних якісних характеристик.

Висновки

1. 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 та розущільнення.
2. 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 встановлені та аналітично описані залежності коефіцієнта ущільнення, пружної післядії, щільності та розущільнення від тиску пресування.
3. Створено математичну модель та експериментально-аналітичний метод оцінки впливу зміни формуючих елементів на пружне розширення брикетів, заснований на використанні полів напружень, що включає побудову епюр розподілу напружень, пружної післядії і щільності після пружного розширення. Створено алгоритм застосування запропонованого методу.

4. Розроблений метод оцінки впливу зміни формуючих елементів на пружне розширення брикетів в сукупності з методом прогнозування зносу робочих поверхонь бандажів валків дозволяє обґрунтовано здійснювати вибір раціональної конфігурації формуючих елементів, який може бути використаний для вирішення завдань оптимізації вибору раціональних конструктивних і експлуатаційних параметрів валків брикетних пресів.
5. Показана можливість застосування створеного методу до вирішення наступних завдань:

- прогнозування і оцінки впливу зміни конфігурації формуючих елементів та 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.

6. Встановлено, що змінюючи розміри та геометричні співвідношення формуючих елементів, можна управляти розподілом характеристик ущільнення і пружної післядії. На прикладі епюр, побудованих для різних матеріалів, показано, що крім конфігурації, істотний вплив на величину і розподіл пружної післядії і щільності надають пружні властивості матеріалу, що брикетується, і це є одним з питань подальших досліджень.
7. На базі порівняльного аналізу епюр розподілу пружної післядії та досягнутої щільності в брикетах, побудованих для досліджуваних формуючих елементів, розроблений новий формуючий елемент, що дозволяє за рахунок збільшення рівномірності розподілу ущільнення в ущільнюваній шихті знизити негативний вплив пружної післядії на якість брикетів.

РОЗДІЛ 4
АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ПРЕСУВАННЯ В ВАЛКАХ НА ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ БРИКЕТУВАННЯ

Підвищення продуктивності валкових пресів технічно найбільш просто здійснити за рахунок збільшення швидкості деформації – підвищуючи частоту обертання валків. Однак при цьому необхідно враховувати обмеження, які обумовлені фізико-механічними властивостями матеріалів, що брикетуються.

Для визначення діапазону можливого збільшення швидкості деформації були виконані теоретичні дослідження щодо впливу швидкості на параметри ущільнення шихт. Слід зазначити, що раніше проводилися розробки такого плану і відносяться вони до області прокатки металевих порошків в гладких валках без сполучного [179-183]. Цими дослідженнями встановлено, що зі збільшенням швидкості деформації щільність спресованого матеріалу зменшується. Вплив швидкості на щільність пояснюється дією повітря, що знаходиться між частинками матеріалу, яке видавлюється з нього в результаті ущільнення в осередку деформації. Витіснене з матеріалу повітря рухається, в основному, в напрямку, протилежному прокатці, і порушує нормальне надходження порошку в зону деформації. Відбувається розущільнення матеріалу, що, в свою чергу, призводить до зміни його фізико-механічних характеристик – щільності шару, коефіцієнтів внутрішнього і зовнішнього тертя. Погіршуються умови зчеплення частинок матеріалу як між собою, так і з поверхнею валків.

Авторами робіт [179-183] запропоновані аналітичні вирази для визначення критичної та максимальної швидкостей прокатки. Розрізняють верхню і нижню критичні швидкості прокатки, а також максимальну, при цьому в зазначених роботах відсутня єдина термінологія, що розмежовує ці поняття.

У даній роботі прийнято, що під критичною V_{kr} швидкістю пресування розуміється значення окружної швидкості обертання валків, при якій починається зменшення щільності спресованого матеріалу. Вище критичної швидкості існує широкий інтервал швидкостей з поступовим зменшенням щільності спресованого матеріалу. Цей діапазон обмежений максимальною

(граничною) швидкістю V_{max} пресування порошку, що відповідає частоті обертання валків, при якій процеси фільтрації повітря призводять до розривів та порушення суцільності в шарі матеріалу, внаслідок чого матеріал не ущільнюється.

На підставі експериментальних досліджень Аксьоновим Г.І. запропоновано наступний аналітичний вираз для визначення критичної швидкості V_{kr} [179,180]:

$$V_{kr} = \frac{K}{2\mu\alpha^2}\left[\frac{\Delta p}{H}\right], \qquad (4.1)$$

де K – коефіцієнт проникності матеріалу; μ – коефіцієнт в'язкості повітря; α – кут захоплення матеріалу валками; ΔP – надлишковий тиск повітря; H – висота стовпа матеріалу.

Частота обертання валків, відповідна критичної швидкості:

$$n_{kr} = \frac{V_{kr} \cdot 30}{\pi \cdot R}. \qquad (4.2)$$

Однак аналітичні вирази (4.1) і (4.2) не враховують ряд факторів: ступінь ущільнення, спосіб подачі матеріалу в зону ущільнення, геометричні параметри завантажувального бункера. Це знижує вірогідність розрахункових даних. Крім того, експериментальне визначення проникності порошку, виражене емпіричними константами, ускладнює практичне використання цих розрахункових виразів.

Шомін І.П., Классен П.В. і Кувшинніков І.М. [181] запропонували вдосконалений аналітичний вираз для оцінки впливу швидкості пресування, в якому врахована форма осередку деформації і подача матеріалу:

$$V_{kr} = \frac{Ar^{0,68}}{600} \cdot \frac{Kc}{K_y - 1} \cdot \frac{\nu_r}{d_{част}}, \qquad (4.3)$$

де Ar – критерій Архимеда; $d_{част}$ – середній діаметр частинок матеріалу; ν_r – кінематична в'язкість повітря; Kc – коефіцієнт стиснення потоку, рівний відношенню початкової товщини шару шихти до товщини спресованого матеріалу; Ky – коефіцієнт ущільнення;

Значення Критерію Архімеда визначається виразом:

$$Ar = \frac{g \cdot d_{част}}{\nu_r^2} \cdot \frac{(\rho_T - \rho_Г)}{\rho_Г}, \qquad (4.4)$$

де g – прискорення сили тяжіння (980 см/с^2); ρ_T – щільність частинки матеріалу; $\rho_Г$ – щільність газової фази (повітря);

Коефіцієнт стиснення потоку визначається наступним чином:

$$K_C = \frac{H_1}{h_{br1}}, \qquad (4.5)$$

де H_1 – ширина шару матеріалу на ділянці захвату валками; h_{br} – товщина брикету на лінії центрів валків в процесі його формування.

Аналітичний вираз (4.1) виведено на підставі обробки експериментальних даних по псевдорозрідженню порошків, отриманих за допомогою моделі прокатного стану з нерухомими валками. Приймається припущення про повне витіснення повітря з шихти, що знаходиться в зоні пресування, що призводить до незадовільної збіжності експериментальних і розрахункових даних.

Катрусом О.А. запропоновані аналітичні вирази для визначення критичної V_{kr} та максимальної V_{max} швидкостей прокатки, які передбачають неповне витіснення повітря із зони пресування і враховують умови подачі матеріалу, і геометричні параметри осередку деформації [182,183]:

$$V_{kr} = \frac{12{,}5 \cdot g \cdot K \cdot R \cdot \rho_{bulk} \cdot \left(\mathrm{Sin}\,\alpha_{щ} - \mathrm{Sin}\,\alpha_{pr}\right)}{\mu \cdot a_c}, \qquad (4.6)$$

де R – радіус валків; ρ_{bulk} – насипна щільність матеріалу; $\alpha_{щ}$ – кут подачі матеріалу; α_{pr} – кут пресування; a_c – товщина шару матеріалу в напрямку найменшого опору фільтрації для ділянки завантажувального пристрою з найбільш трудною фільтрацією.

$$V_{\max} = (1{,}5 \ldots 10) \cdot V_{kr}\,. \qquad (4.7)$$

В роботі [183] показано, що розрахунок за формулами (4.6) і (4.7) дає задовільний збіг з експериментальними даними.

Характер ущільнення дрібнофракційних шихт в валковому пресі відрізняється від прокатки металевих порошків в гладких валках наявністю формуючих елементів та об'ємом зони пресування, яка поступово замикається. Крім того, наявність сполучних речовин в шихті змінює фізико-механічні властивості матеріалу, коефіцієнти внутрішнього і зовнішнього тертя, його газопроникність та поведінку в осередку деформації.

На базі виразів (4.6, 4.7) сформована математична модель, яка описує вплив частоти обертання валків брикетного преса на коефіцієнт ущільнення в осередку деформації:

$$Ky = Kc\frac{Ar^{0{,}68} \cdot \nu_r}{20 \cdot \pi \cdot d_{част} \cdot R \cdot n} + 1\ , \qquad (4.8)$$

Ку – коефіцієнт ущільнення; *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.

Для отримання брикетів з необхідними щільністю та міцністю з матеріалів з різними фізико-механічними характеристиками, особливо з малою насипною

щільністю, необхідно чітко уявляти закономірності ущільнення шихт при різних схемах осередку деформації. Ці питання як в теоретичному, так і в експериментальному плані вивчені недостатньо, особливо для умов ущільнення шихт в валках з формуючими елементами.З метою оцінки застосовності аналітичних виразів (4.3), (4.6), (4.7) та (4.8) до дослідження процесу брикетування дрібнофракційних шихт в формуючих елементах валкового преса в роботі виконані спеціальні дослідження. Вони включали отримання експериментальних даних про вплив швидкості деформації на параметри ущільнення дрібнофракційних шихт в валковому пресі та їх порівняльний аналіз з розрахунковими даними, отриманими з використанням наведених вище виразів. Експерименти виконувалися на валковому пресі ІЧМ з діаметром валків 500 мм. Регулювання частоти обертання валків здійснювалося в діапазоні 1...3 хв$^{-1}$. Формуючі елементи, виконані на робочій поверхні валків, мають зубчасто-жолобчасту несиметричну конфігурацію (рис. 4.1), глибина формуючого елемента дорівнює – 14,5 мм. Прес оснащений спеціальним завантажувальним пристроєм для подачі матеріалу в валки, його схематичне зображення наведено на рис. 4.2.

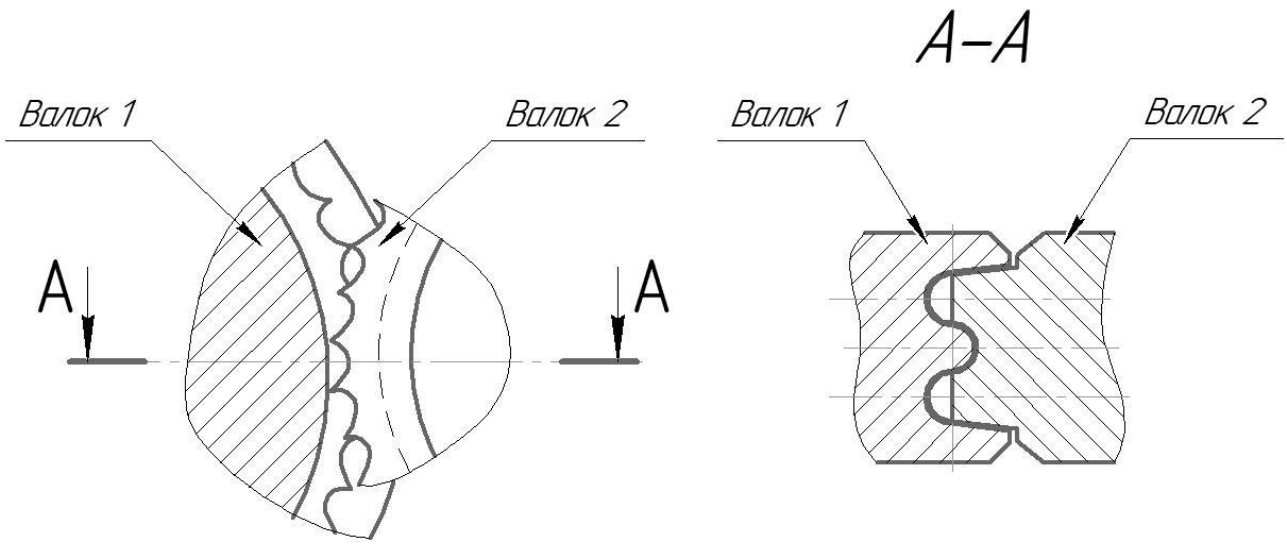


Рисунок 4.1 – Зубчасто-жолобчаста несиметрична конфігурація формуючих елементів

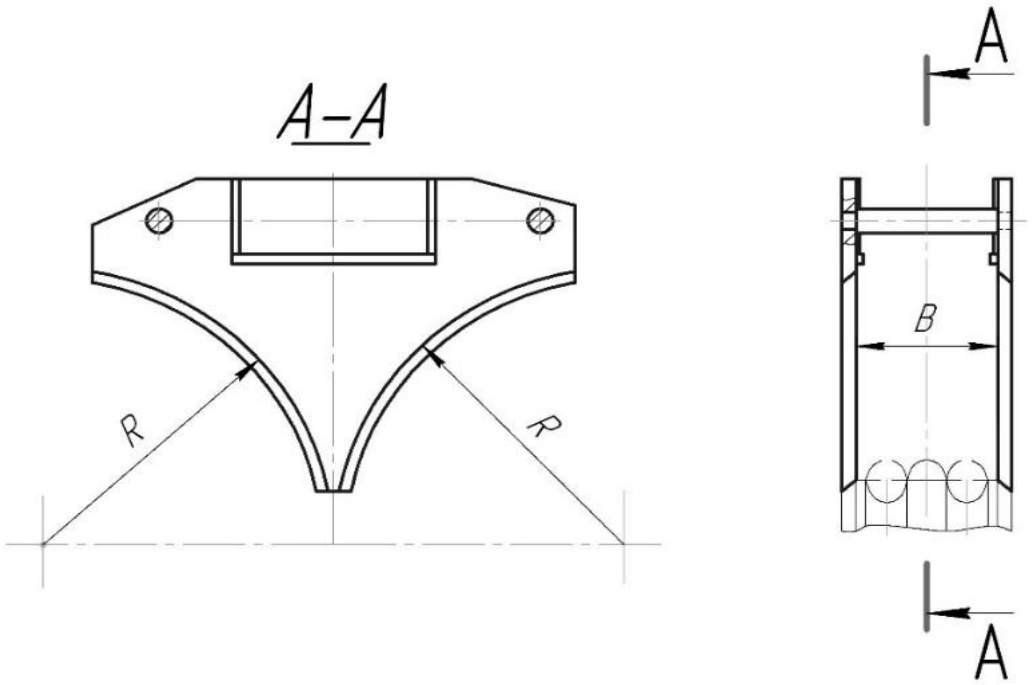


Рисунок 4.2 – Загальний вигляд завантажувального пристрою преса
R – радіус валка; В – ширина завантажувального пристрою

Виконано оцінку придатності наведених вище аналітичних виразів для оцінки впливу швидкості пресування на параметри ущільнення дрібнофракційних шихт в валкових пресах. Необхідні експериментальні дані отримані на валковому пресі. Пресування брикетів здійснювалося при частотах обертання валків 1, 2 і 3 $хв^{-1}$.

Для проведення досліджень використано шихти:

1. 96,5% силікомарганцю (фр.-6 мм) і 3,5% ОС;
2. 90% коксового дріб'язку (фр. -3 мм) і 10% ЛСТ.

В якості вихідних даних для виконання розрахунку взяті: геометричні параметри валків (радіуси, глибина формуючих елементів), ширина завантажувального бункера преса, кут подачі шихти і кут пресування, а також насипна щільність, коефіцієнт газової проникності шихти, щільність брикетів та ін. Значення кутів захоплення матеріалу валками, подачі та пресування визначалися за допомогою розроблених в ІЧМ методик [1,77,79,87,133]. Значення коефіцієнтів ущільнення визначалися як відношення щільності брикетів до насипної щільності шихти.

Далі наведені конкретні значення зазначених початкових даних: $g = 980 \text{см/с}^2$; $\mu = 1{,}81\times10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}}$; $\frac{K}{\mu} = 1120\times10^6$ см^3·с/г; $v_r = 1{,}63801\times10^6$ м^2/с; R=250-14,5мм; B=110мм; $\rho_Г = 1{,}105$ кг/м^3;

- для шихти на основі силікомарганцю – $\alpha_{ц}=25°$; $\alpha_{pr}=16{,}9°$; $\rho_{bulk} = 2{,}1$ г/см^3; $\rho_{br} = 4{,}627$ г/см^3; $\rho_Т = 5{,}88\times10^3$ кг/м^3; $d_{част} = 2{,}22$ мм;

- для шихти на основі коксового дріб'язку - $\alpha_{ц}=45°$; $\alpha_{pr}=20{,}0°$; $\rho_{bulk} = 0{,}49$ г/см^3; $\rho_{br} = 1{,}46$ г/см^3; $\rho_Т = 1{,}8\times10^3$ кг/м^3; $d_{част} = 1{,}17$ мм.

Розрахунково-аналітичним шляхом з використанням виразів (4.2) і (4.8) отримані криві, що описують вплив швидкості деформації на коефіцієнти ущільнення *Ку* шихт, що брикетуються, які представлені на рис. 4.3. і 4.4.

Характер кривих свідчить про різке зменшення величини *Ку*, починаючи з частоти обертання валків n_{kr}, яка визначається верхньою критичною швидкістю пресування V_{kr} і аж до 14…16 хв$^{-1}$.

Виконано порівняльний аналіз розрахункових даних з результатами брикетування шихт на експериментальному валковому пресі ІЧМ. Експериментальні значення коефіцієнтів ущільнення розраховували шляхом ділення щільності брикетів на насипну щільність шихти. Точки на рис. 4.3 і 4.4, відповідні експериментальним значенням *Ку*, мають велику робіжність з розрахунковою кривої. Таким чином, аналітичні вирази (4.7) і (4.8) не можуть бути використані для опису процесу ущільнення дрібнофракційних шихт в формуючих елементах валкових пресів.

Далі була виконана оцінка можливості застосування аналітичних виразів для визначення критичної та граничної швидкостей прокатки, отриманих Катрусом О.А. [183].

Як сказано раніше, в інтервалі частот нижче n_{kr}, яка відповідає критичній швидкості пресування, щільність брикетів не знижується.

Прийнято припущення, що, починаючи з n_{kr}, зі збільшенням частоти обертання валків відбувається монотонне зниження величини ущільнення.



Рисунок 4.4 – Залежність коефіцієнту ущільнення від частоти обертання валків 96,5% силікомарганцю і 3,5% ОС (розрахунок з використанням виразу (4.8))

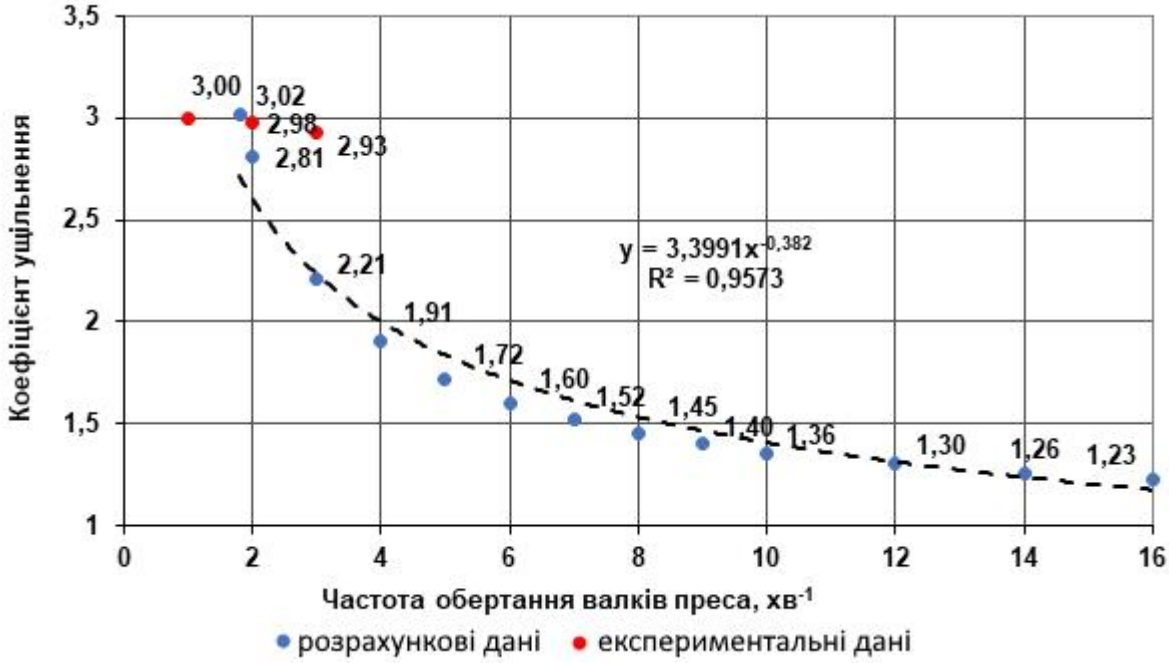


Рисунок 4.5 – Залежність коефіцієнту ущільнення від частоти обертання валків 90% коксового дріб'язку і 10% ЛСТ (розрахунок з використанням виразу (4.8))

Дане явище спостерігається аж до моменту, коли частота обертання валків досягає значення n_{max}, відповідного до V_{max}, при якому величина *Ку* наближається до одиниці. Беручи до уваги зазначені допущення, з використанням формул (4.6) і (4.7) отримані розрахункові графічні залежності, що характеризують вплив швидкості деформації на параметри ущільнення шихти (рис. 4.5, 4.6). Криві, представлені на рис. 4.5 та 4.6, обмежені частотами обертання валків 12 хв$^{-1}$, так як цей інтервал становить найбільший практичний інтерес при проектуванні пресового обладнання для брикетування широкої номенклатури дрібнофракційних шихтових матеріалів. Порівняння розрахункових і експериментальних даних вказують на добру збіжність (рис. 4.5, 4.6), що дозволяє зробити висновок про можливість використання зазначених аналітичних виразів та прийнятих в роботі припущень для дослідження впливу швидкості пресування на параметри ущільнення шихт з різними фізико-механічними характеристиками в валкових пресах.

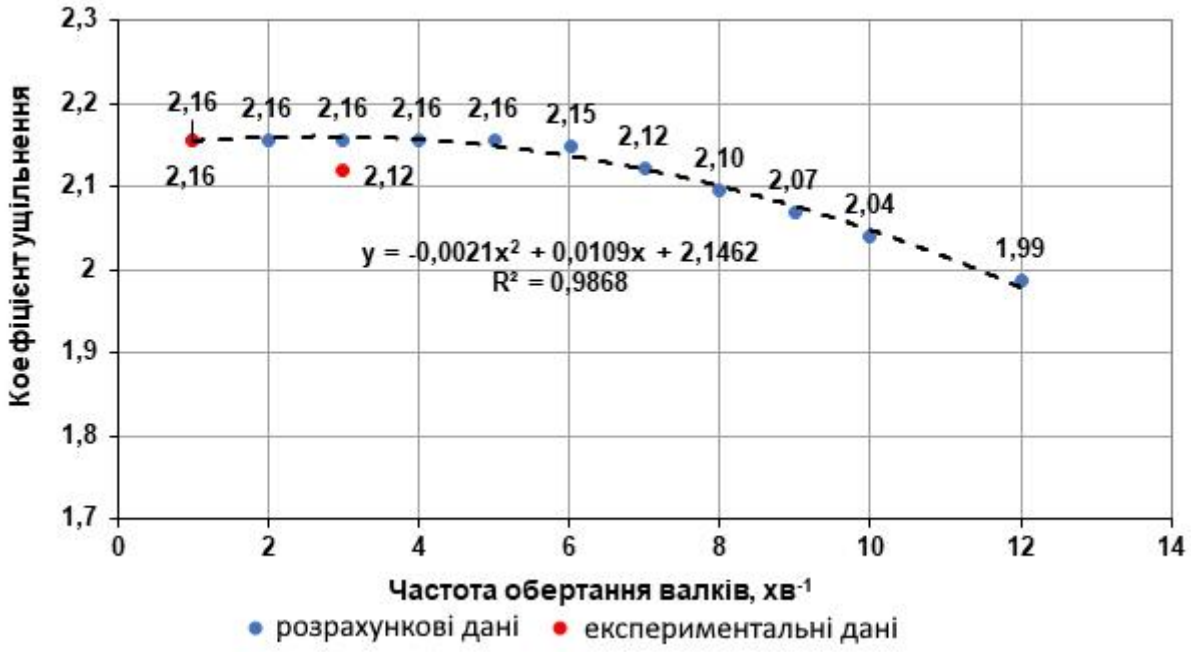


Рисунок 4.5 – Залежність коефіцієнту ущільнення від частоти обертання валків преса деформації для шихти 96,5% силікомарганцю і 3,5% ОС, (розрахунок з використанням формул 4.6, 4.7)

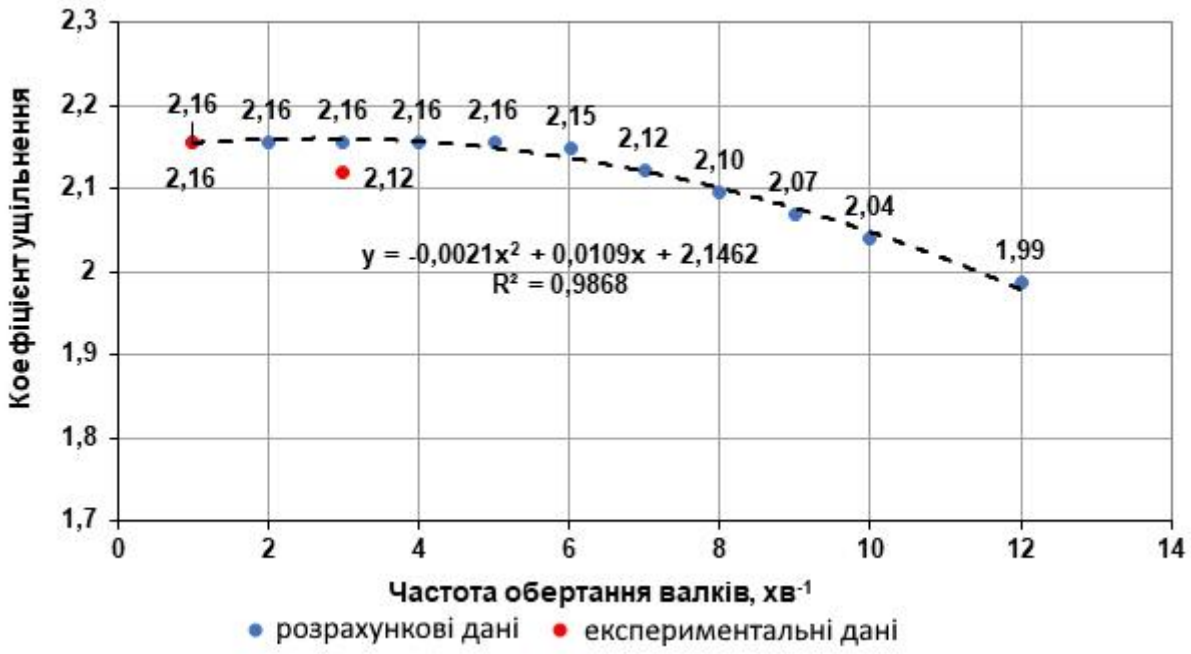


Рисунок 4.6 – Залежність коефіцієнту ущільнення від частоти обертання валків преса для шихти 90% коксового дріб'язку і 10% ЛСТ, (розрахунок з використанням формул 4.6, 4.7)

Рис. 4.5 та 4.6 вказують на те, 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 з 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 *p* - коефіцієнт ущільнення *Ку*».

Ущільнення шихт в діапазоні частот обертання валків від 0 до n_{kr} описується графічними залежностями, представленими на рис. 4.7, які, відповідно, описуються наступними аналітичними виразами:

96,5% силікомарганцю і 3,5% ОС

$$p = 1,6799 \cdot 10^{-2} \cdot K_y^{10,468}, \qquad (4.9)$$

90% коксового дріб'язку і 10% ЛСТ

$$p = 7{,}2359 \cdot 10^{-2} \cdot K_y^{\,6{,}7015}, \qquad (4.10)$$

У загальному вигляді вирази (4.9) і (4.10) описані рівнянням:

$$p = a \cdot Ky^{b}, \qquad (4.11)$$

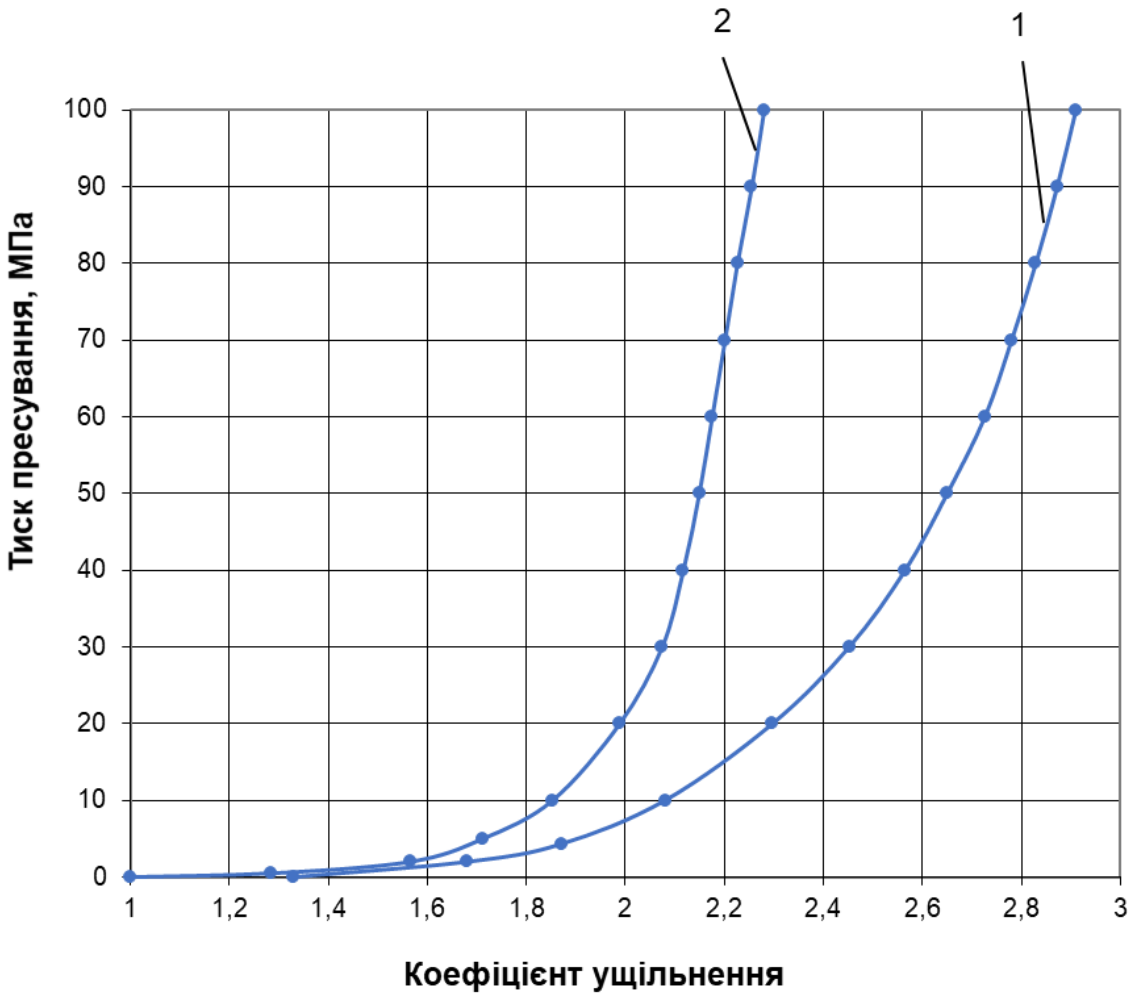


Рисунок 4.7 – Залежність коефіцієнта ущільнення від тиску пресування:

1. 90% коксового дріб'язку (фр. -3 мм) і 10% ЛСТ

2. 96,5% силікомарганцю (фр. -6 мм) і 3,5% ОС

Зменшення значень *Ку* зі збільшенням частоти обертання валків обумовлено процесами фільтрації повітря, внаслідок чого зменшується опір шихти стиску. Щоб врахувати це явище, в рівняння (4.11) вводиться поправочний коефіцієнт k_n, тоді воно прийме наступний вигляд:

$$p = k_n \cdot a \cdot Ky^b . \qquad (4.12)$$

Значення коефіцієнта k_n визначається як відношення значення коефіцієнта ущільнення при швидкості пресування менше V_{kr} до значення коефіцієнта ущільнення, відповідного вибраній частоті обертання валків. Наприклад, обрані частоти обертання валків – 1, 8, 10 и 12 хв$^{-1}$. Використовуючи графічні залежності, представлені на рис. 4.8 і 4.9, визначаємо значення K_y для обраних частот обертання і обчислюємо значення k_n наступним чином:

- для шихти 97% силікомарганцю і 3,5% ОС – $2{,}16/2{,}16 = 1$; $2{,}16/2{,}1 = 1{,}029$; $2{,}16/2{,}04 = 1{,}059$; і $2{,}16/1{,}99 = 1{,}085$;
- для шихти 90% коксового дріб'язку та 10% ЛСТ – $3{,}00/3{,}00 = 1$; $3{,}00/2{,}69 = 1{,}115$; $3{,}00/2{,}53 = 1{,}186$; і $3{,}00/2{,}38 = 1{,}261$.

Беручи значення коефіцієнтів *a* і *b* з виразів (4.9) і (4.10), за формулою (4.12) для обраних частот обертання валків розраховуємо тиск пресування і коефіцієнти ущільнення та будуємо криві ущільнення для досліджуваних шихт (рис. 4.8, 4.9). У табл. 4.1 наведені розрахункові значення *p* та K_y для прийнятих параметрів осередку деформації. Дані, представлені в таблиці 4.1, наочно демонструють, що зі збільшенням швидкості пресування опір шихти стисненню зменшується, в результаті чого змінюється напружено-деформований стан в осередку деформації, показниками якого є тиск пресування та максимально можливий для даних геометричних параметрів осередку деформації коефіцієнт ущільнення. Тому, відповідно до залежностей, представлених на рис. 4.6 і 4.7, а також даних табл. 4.1 кожна з кривих ущільнення, представлених на рис. 4.8 і 4.9, обмежена відповідним значенням коефіцієнту ущільнення.

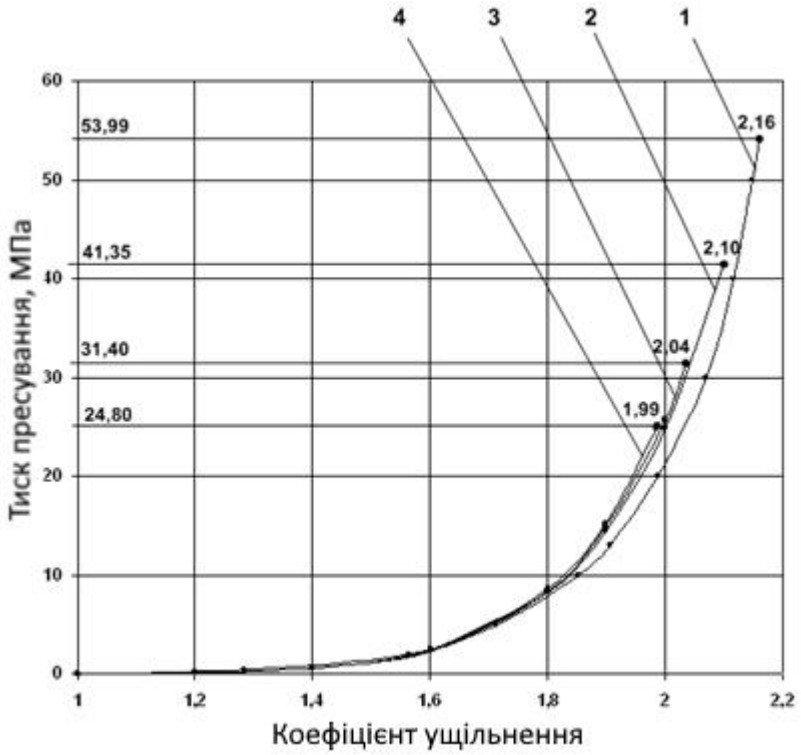


Рисунок 4.8 – Залежність коефіцієнта ущільнення від тиску пресування для шихти з 96,5% силікомарганцю і 3,5% ОС при частоті обертання валків:

1 – 1 хв$^{-1}$; 2 – 8 хв$^{-1}$; 3 - 10 хв$^{-1}$; 4 – 12 хв$^{-1}$

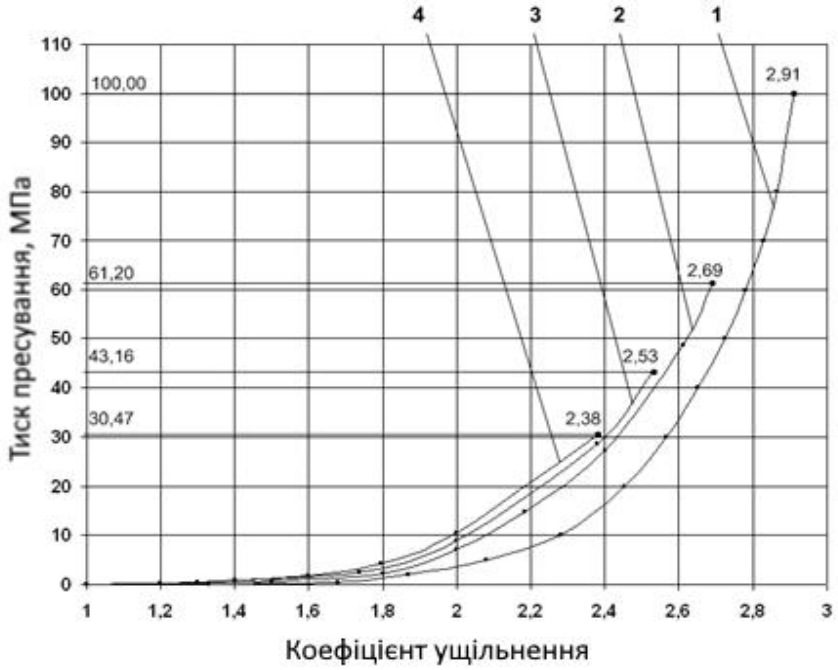


Рисунок 4.9 – Залежність коефіцієнта ущільнення від тиску пресування для шихти з 90% коксового дріб'язку і 10% ЛСТ при частоті обертання валків:

1 – 1 хв$^{-1}$; 2 – 8 хв$^{-1}$; 3 - 10 хв$^{-1}$; 4 – 12 хв$^{-1}$

Таблиця 4.1 – Взаємозв'язок тиску пресування з коефіцієнтом ущільнення при різній частоті обертання валків преса

Шихта	n, хв$^{-1}$	Ky	p, МПа
96,5% силікомарганцю і 3,5% ОС	1	2,16	53,99
	8	2,1	41,35
	10	2,04	31,40
	12	1,99	24,80
90% коксового дріб'язку і 10% ЛСТ	1	3,00	100,00
	8	2,69	61,20
	10	2,53	43,16
	12	2,38	30,47

На підставі виконаних експериментальних досліджень і теоретичного аналізу адаптованих до умов профільованих валків аналітичних виразів, що описують вплив швидкості пресування на ущільнення шихти, розроблена методика вибору припустимого підвищення частоти обертання валків, при якій можливе отримання необхідного коефіцієнта ущільнення шихти [184]. Вона полягає в наступному. Для кожної шихти, з певною сукупністю фізико-механічних властивостей з використанням виразів (4.6) і (4.7) будуються графічні залежності $Ky=f(n_{roll})$ (n_{roll} – частота обертання валків) та, використовуючи рівняння (4.12), криві ущільнення $p=f(Ky)$. Задаючи необхідний Ky та розглядаючи спільно отримані графіки, встановлюється припустима гранична частота обертання валків, при якій в зоні ущільнення розвивається тиск, достатній для формування брикетів заданої щільності. Графіки рис. 4.6 і 4.7 перебудовані в координатах «тиск пресування - частота обертання валків n_{roll}» – рис. 4.10.

Рисунок 4.10 показує, що для двох шихт з різними фізико-механічними характеристиками і ступенем опору стисненню вплив швидкості пресування на параметри ущільнення також буде проявлятися в різній мірі. З ростом швидкості деформації в валковому пресі відбувається монотонне зниження тиску

пресування, при цьому ступінь (градієнт) зміни цього параметра визначається фізико-механічними властивостями шихти, що брикетуються.

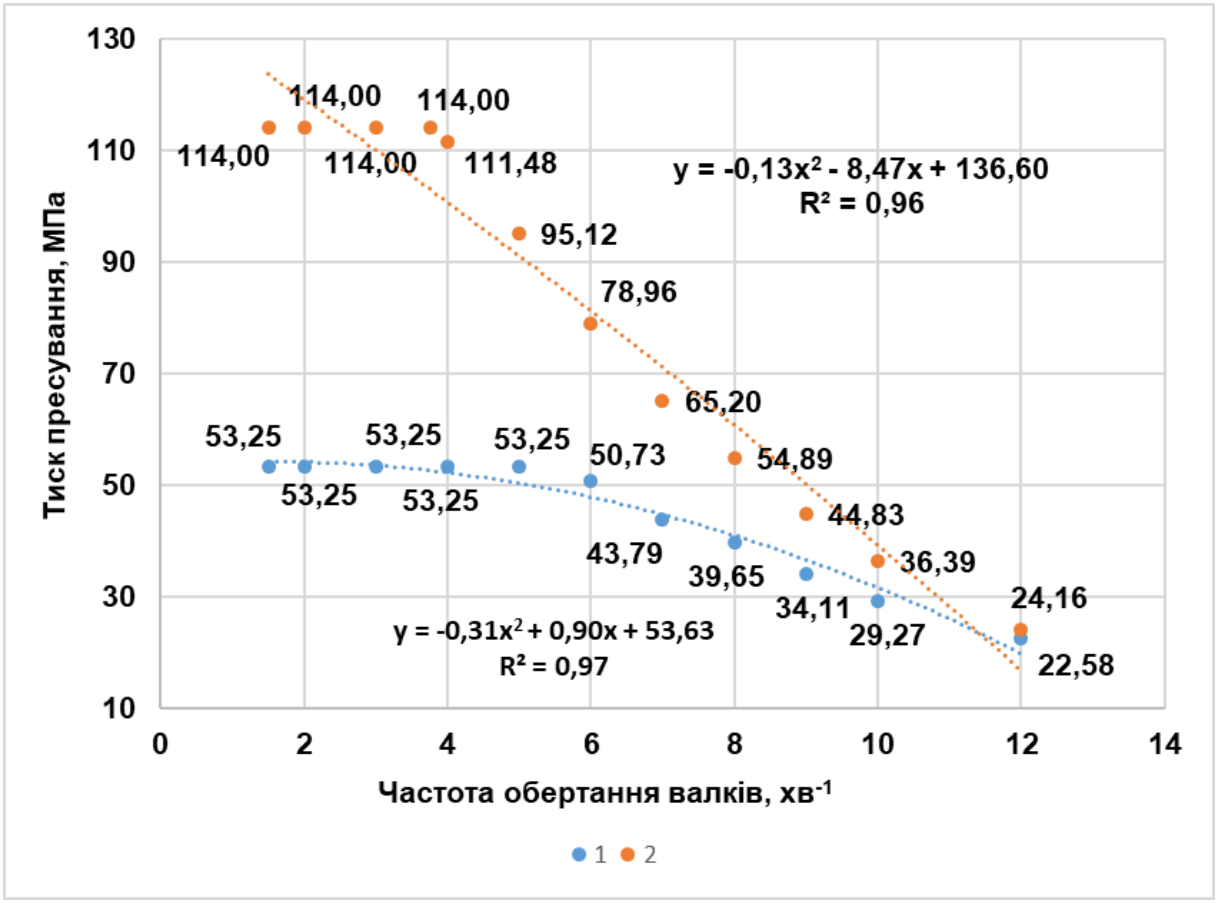


Рисунок 4.10 – Залежність тиску пресування від частоти обертання валків преса

1. 96,5 % силікомарганцю і 3,5 % ОС
2. 90 % коксового дріб'язку і 10 % ЛСТ

Вирази 4.1, 4.2, 4.4-4.8, 4.11, 4.12 є математичною моделлю для оцінки та прогнозування впливу швидкості пресування на параметри процесу брикетування з врахуванням конфігурації формуючих елементів.

Для підтвердження результатів досліджень наведених в даному розділі роботи виконано порівняльний аналіз експериментальних даних про вплив частоти обертання валків пресів на параметри брикетування дрібнофракційних матеріалів та прокатки порошків в гладких валках.

На рис. 4.11 представлено взаємозв'язок між частотою обертання валків і тиском пресування для процесу прокатки-пресування мікрокристалічної целюлози в гладких валках [185] при різній величині зазору між валками. Теоретичні розрахунки в роботі [185], виконані з використанням моделей Йохансона [57, 60], показують, що вони не дозволяють визначити впливу частоти обертання валків на зміну параметрів пресування. Тобто, зі зміною швидкості обертання валків величина тиску пресування залишається незмінною.

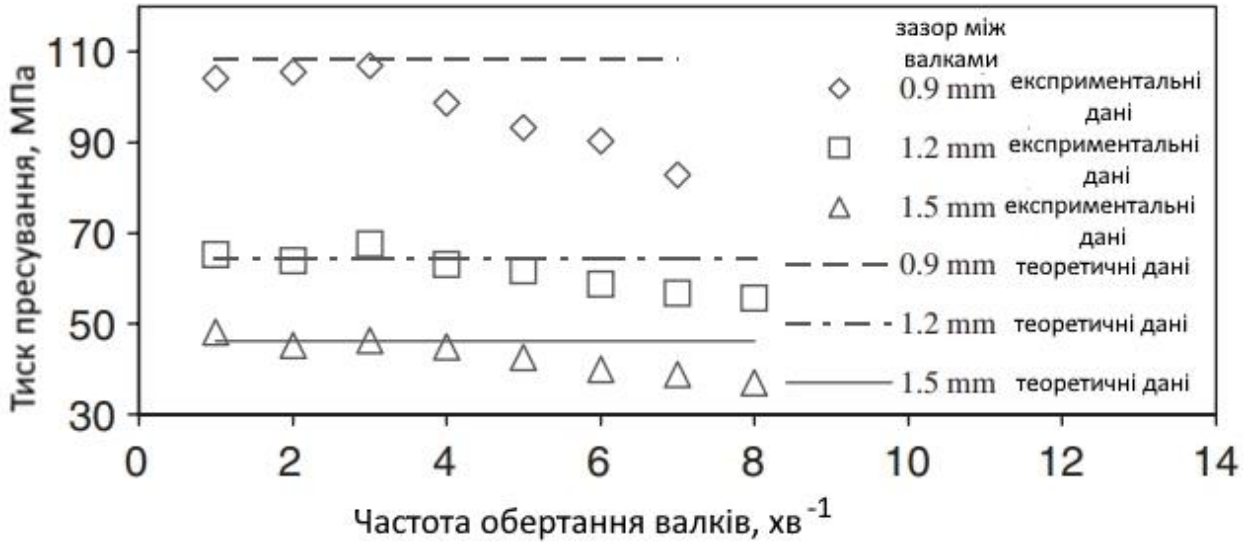


Рисунок 4.11 – Вплив частоти обертання валків на величину тиску прокатки-пресування мікрокристалічної целюлози

У той же час результати експериментальних досліджень роботи [147] вказують на те, що з ростом частоти обертання валків спостерігається монотонне зниження тиску пресування в осередку деформації.

До аналогічного результату прийшли дослідники в роботі [186]. Досліджений діапазон відповідав частоті обертання валків 2,12…12,72 хв$^{-1}$. На рис. 4.12 представлена залежність тиску пресування від чатоти обертання валків, яка побудована за результатами досліджень роботи [186]. Тут також видно монотонне зниження тиску пресування з ростом частоти обертання валків.

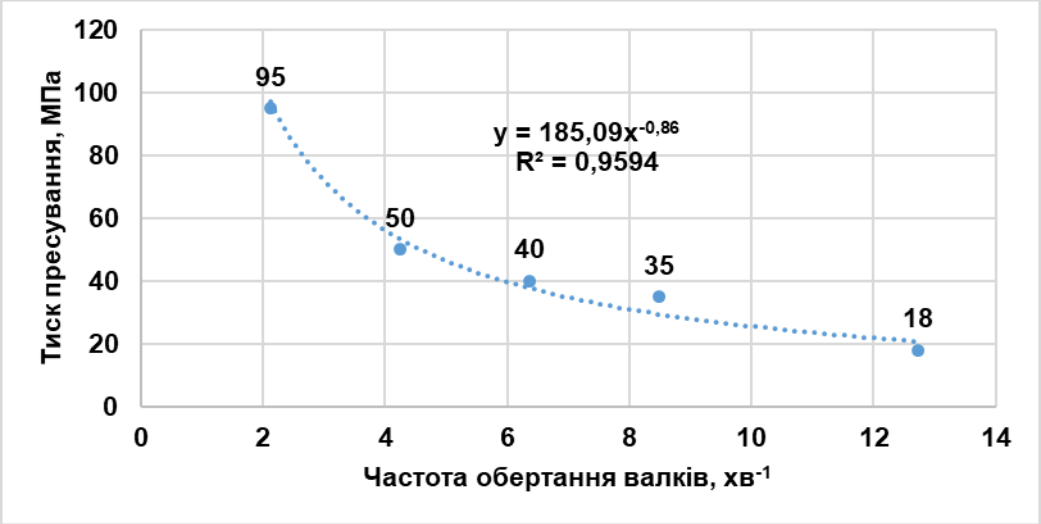


Рис. 4.12 – Вплив частоти обертання валків на величину тиску пресування кам'яної солі

Експериментальні дані впливу частоти обертання валків на параметри брикетування алюмінієвої стружки і залізорудної шихти, отримані В.А. Носковим [1] (рис. 4.13,) також показують монотонне зниження параметрів ущільнення з ростом швидкості деформації в валках.

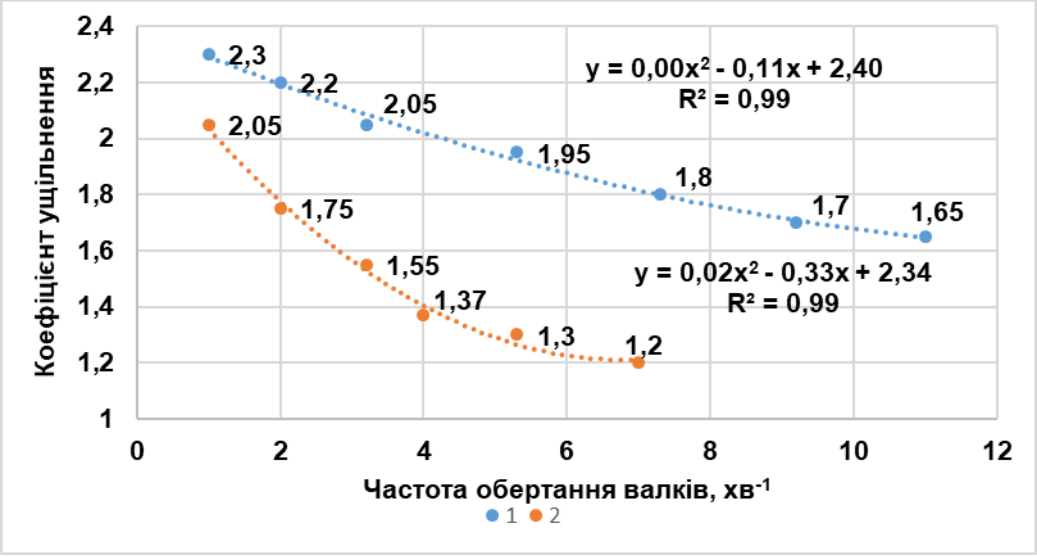


Рисунок 4.13 – Вплив частоти обертання валків на величину ущільнення шихти
1. алюмінієва стружка; 2. залізорудна шихта

Із зіставлення результатів розрахунково-аналітичного визначення за допомогою запропонованої математичної моделі впливу швидкості пресування на

параметри брикетування шихт в валкових пресах з результатами експериментальних досліджень, виконаних різними вченими, очевидна їх якісна відповідність. Це є підтвердженням правомочності прийнятих теоретичних передумов. Надалі накопичення експериментальних і розрахункових даних дозволить удосконалити запропонований в даному розділі роботи метод і розширити його застосовність до прогнозування процесів брикетування шихт з широким спектром фізико-механічних характеристик та вибору раціональних конструктивних рішень валкових пресів, що забезпечують нормальні умови роботи обладнання та виробництво брикетів заданої якості.

Висновки

1. Показано, що для визначення впливу швидкості обертання валків брикетного преса на параметри ущільнення шихт за основу можуть бути прийняті результати теоретичних досліджень процесу прокатки металевих порошків в гладких валках.
2. В результаті зіставлення експериментально отриманих даних, щодо зміни коефіцієнтів ущільнення шихт в формуючих елементах валкових пресів з відомими аналітичними залежностями визначення критичної і максимальної швидкостей прокатки встановлено, що з найбільш раціональним є аналіз досліджуваного процесу з використанням трансформованого виразу, запропонованого Катрусом.
3. Розроблено математичну модель вибору припустимого підвищення частоти обертання валків, при який можливе отримання необхідного коефіцієнта ущільнення шихти в формуючих елементах валків брикетного преса. Запропоновано аналітичні вирази та поправочний коефіцієнт, що дозволяють прогнозувати вплив швидкості пресування на параметри ущільнення шихти в осередку деформації валкового преса.
4. Для підтвердження достовірності результатів досліджень проведено порівняльний аналіз експериментальних даних про вплив частоти обертання

валків пресів на параметри брикетування дрібнофракційних матеріалів та прокатки порошків в гладких валках. Виконаний аналіз підтвердив правомірність прийнятих теоретичних передумов та якісну відповідність результатів розрахунково-аналітичних досліджень до фізичних процесів, що протікають при брикетуванні дрібнофракційних шихт в валковому пресі при зміні швидкості пресування.

РОЗДІЛ 5
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКІВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ШНЕКОВОГО ПІДПРЕСОВНИКА ВАЛКОВОГО ПРЕСА ТА ПАРАМЕТРІВ БРИКЕТУВАННЯ

Необхідність використання підпресовника виникає при вирішенні задач отримання брикетів з матеріалів з низькою насипною щільністю ($\rho_{br} \leq 0{,}6$ г/см^3), які вимагають примусової подачі в міжвалковий простір, таких, що схильні до псевдорозрідження, підвисання і зводоутворення при гравітаційної подачі в осередок деформації. Для отримання готових брикетів коефіцієнт ущільнення таких матеріалів повинен бути рівний, або перевищувати 3,0 од. Найбільшого поширення на практиці в якості пристроїв для примусової подачі та попереднього ущільнення шихти в процесах валкового брикетування отримали підпресовники шнекового типу, які можуть оснащуватися, залежно від технологічних умов, різними типами шнеків – циліндричними, конічними, складними, в тому числі, з постійним і змінним кроком витків [187-189].

Залежно від фізико-механічних характеристик матеріалів, що брикетуються, в даний час в конструкції шнекових підпресовників та транспортерів застосовуються різні типи шнеків [187-189]:

- циліндричні з постійним кроком;
- шнеки з верхньою конічною та нижньою циліндричною частиною;
- конічні шнеки зі зменшенням кроку витків;
- шнеки з короткою циліндричною нарізкою на кінці, які використовуються для дозування;
- одно-, дво- і багатозахідні шнеки.

У верхній частині шнеків іноді встановлені розрихлювачі шихти, що перешкоджають зависанню шихти на вході в порожнину шнека. Відомі конструкції підпресовників зі змінним перетином осі по довжині шнека. Як правило, крок витка знаходиться в межах від 0,5 до 1,0 зовнішнього діаметра шнека. Величина

зовнішнього діаметра шнека визначається шириною робочої поверхні валків. Так, при ширині валків 250 мм діаметр шнека може становити 250...300 мм.

При великій ширині робочих поверхонь валків та в конструкціях пресів з роздвоєними валками застосовуються кілька шнекових подпресовників з індивідуальним приводом. Іноді ці шнеки встановлюють на єдину раму, яка монтується на прес.

Привід підпресовників може бути механічний або гідравлічний. Найбільш поширені шнекові підпресовники з механічним приводом.

Відомі кілька варіантів комплектації механічного приводу шнекових підпресовників:

1. Мотор-редуктор з планетарною, черв'ячною або конічною передачею.

2. Електродвигун в парі з черв'ячним або конічним редуктором.

3. Електродвигун, клиноремінна або ланцюгова передача та редуктор.

На практиці найбільшого поширення набув перший тип приводу з урахуванням його компактності та зручності обслуговування.

Раніше для приводів шнекових підпресовників рекомендували використання електродвигунів постійного струму, так як вони забезпечували плавне регулювання частоти обертання шнека. В даний час з цим завданням відмінно справляється привід, оснащений асинхронним двигуном змінного струму і частотним перетворювачем.

Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених дослідженню конструктивних та експлуатаційних параметрів шнекових механізмів, основною проблемою при створенні шнекових підпресовників для валкових пресів є відсутність чіткого системного підходу до визначення їх раціональних конструктивних та енергосилових параметрів. Це обумовлено тим, що при проектуванні шнекового механізму слід враховувати значну кількість факторів, які взаємопов'язані між собою. При цьому з кожним роком розширюється сфера застосування валкових пресів, оснащених шнековими підпресовниками, для брикетування нових типів шихт. У зв'язку з цим, завдання створення методу та

математичної моделі для визначення раціональних параметрів шнекових підпресовників для валкових пресів є актуальним завданням.

На рис. 5.1 представлена схема підпресовника, встановленого на валковий прес.

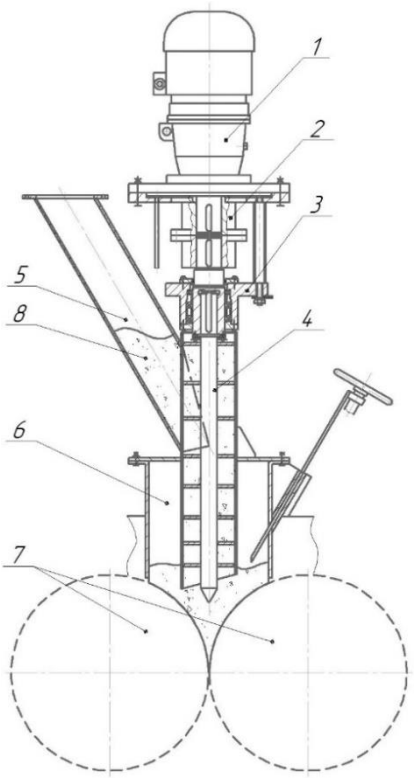


Рисунок 5.1 – Загальний вигляд шнекового підпресовника валкового преса
1 – мотор-редуктор; 2 – муфта; 3 – опорно-підшипниковий вузол підпресовника; 4 – шнек; 5 – завантажувальна ділянка підпресовника; 6 – завантажувальний пристрій валкового преса; 7 – валки преса

5.1. Математична модель для досліджень параметрів шнекового підпресовника валкового преса

Перед початком проектування, аналізу і вибору параметрів шнекового підпресовника валкового преса необхідно визначити умови його застосування з урахуванням фізико-механічних властивостей шихти.

В роботі [190] запропоновано графоаналітичний метод визначення типу пристрою для подачі шихти в валковий прес. Сутність даного підходу полягає в наступному. Експериментально визначаються характеристики ущільнення

шихти та будується крива її ущільнення в координатах «коефіцієнт ущільнення Ky – тиск пресування p». Далі визначаються пріоритетні методи подачі шихти в осередок деформації відповідно до таких умов:

- гравітаційна подача

$$Ky_{br.\max} \le 2,0. \tag{5.1}$$

- підпресовник шнекового типу з циліндричним шнеком

$$2,0 \le Ky_{br.\max} \le 2,6. \tag{5.2}$$

- підпресовник шнекового типу з конічним шнеком

$$2,6 \le Ky_{br.\max}, \tag{5.3}$$

де $Ky_{br.\max}$ – максимально можливий коефіцієнт ущільнення шихти в брикети.

Як показує практичний досвід фахівців ІЧМ, в ряді варіантів при брикетуванні матеріалів в валкових пресах з використанням шнекових підпресовників, оснащених циліндричними шнеками, вдавалося досягати значень коефіцієнтів ущільнення більше, ніж 2,6. При цьому використання конічних шнеків показало наступні складності в їх застосуванні – дороговизна виготовлення, часті залипання шихти в каналі шнека при зміні її фізико-механічних властивостей. Тому, цілком виправданим, якщо це не обумовлено окремо, для більшості матеріалів з малою насипною щільністю ($\rho_{bulk} \le 0,6$ г/см^3), які брикетуються на підприємствах гірничо-металургійного комплексу, є застосування шнекових підпресовників валкових пресів, оснащених циліндричним шнеком. Тому в даній роботі мова піде про дослідження підпресовника з циліндричним шнеком.

Аналіз роботи [190] показує, що умови (5.1-5.3) є емпіричними, крім того, відсутнє чітке обґрунтування їх формування. Отже, актуальним є розробка

науково-обґрунтованого підходу до вибору раціональних параметрів шнекового підпресовника. З практики пресування відомо, що досягти щільності компактного тіла при ущільненні дрібнофракційних матеріалів вкрай складно. Як правило, величина максимальної щільності, що досягається, на 5…15% менше щільності компактного тіла з даного типу матеріалу. Вибір схеми подачі матеріалу в валки залежить від можливості досягнення максимальної величини коефіцієнта ущільнення, що визначається за допомогою виразу:

$$Ky_{br.\max} = \frac{\rho_{pikn}}{\rho_{bulk}}, \tag{5.4}$$

де ρ_{pikn} – пікнометрична (істинна) щільність частинок шихти, г/см^3; ρ_{bulk} – насипна щільність шихти, г/см^3.

Залежно від ступеня ущільнення, що досягається при конкретній схемі подачі шихти, та в результаті зіставлення її з максимально досягаємою величиною приймається рішення про схему подачі шихти в валки. Ці умови в формалізованому вигляді представлені нижче:

- гравітаційна подача

$$Ky_{roll.\max} \geq Ky_{br.\max}, \tag{5.5}$$

- підпресовник шнекового типу

$$Ky_{roll.\max} \leq Ky_{br.\max}, \tag{5.6}$$

де $Ky_{roll.max}$ – максимально можливий коефіцієнт ущільнення шихти в міжвалковому просторі [71]:

$$Ky_{roll.\max} = 1 + \frac{D_0 \cdot (1 - \cos\alpha_0)}{H_{br}}. \tag{5.7}$$

де D_0 – приведений діаметр валків преса, мм; H_{br} – товщина брикету на лінії центрів валків, мм; α_0 – максимальний кут пресування, який визначається умовами захоплення шихти валками:

- для валків з зубчасто-жолобчастою конфігурацією формуючих елементів [78]:

$$\alpha_0 = \arcsin\frac{1}{D_0}[R_0 \cdot \sin\alpha_{ch} + (R_0 + (H_{br} - \delta_{roll})) \cdot \sin\alpha_c - \\ -(D_0 + H_{br} - R_0 \cdot \cos\alpha_{ch} - (R_0 + H_{br}) \cdot \cos\alpha_c) \cdot tg\theta], \quad (5.8)$$

- для валків із симетричною конфігурацією формуючих елементів (лінзоподібної, подушкоподібної) [78]:

$$\alpha_0 = \arcsin\left(\sin\alpha_c - \left(1 - \cos\alpha_c + \frac{\delta_{roll}}{D_0}\right) \cdot tg\theta\right), \quad (5.9)$$

де R_0 – приведений радіус валків преса, мм; δ_{roll} – зазор між валками, мм; θ – кут нахилу ліній ковзання, град; α_c – граничний кут подачі для ряду формуючих елементів з жолобчастим профілем, град:

$$\alpha_c = arctgf_2 + arctg\xi; \quad (5.10)$$

α_{ch} – граничний кут подачі для ряду формуючих елементів з жолобчастим профілем, град:

$$\alpha_{ch} = arctgf_1 + arctg\xi; \quad (5.11)$$

f_2 – коефіцієнт внутрішнього тертя; f_1 – коефіцієнт зовнішнього тертя; ξ - коефіцієнт бокового тиску:

$$\xi = \frac{1 - \mathrm{Sin}\,\varphi_2}{1 + \mathrm{Sin}\,\varphi_2}. \qquad (5.12)$$

Значення коефіцієнтів зовнішнього та внутрішнього тертя визначаються за методикою, описаною в роботі [84].

Як зазначалося раніше в роботі, для аналізу процесу пресування дрібнофракційних матеріалів і розрахунку параметрів процесу брикетування та подальшого вибору конструктивних параметрів пресового обладнання фахівці ІЧМ використовують експериментально встановлений та описаний аналітичним виразом функціональний взаємозв'язок між тиском пресування p і коефіцієнтом ущільнення Ky [84]. Як правило, для опису цього взаємозв'язку використовується ступенева функція, тобто зазначений взаємозв'язок виглядає наступним чином:

$$p = a \cdot Ky^b, \qquad (5.13)$$

де a та b – коефіцієнти в рівнянні апроксимації кривої пресування дрібнофракційної шихти, що характеризують ступінь її опору стисненню;

Ky – коефіцієнт ущільнення:

$$Ky = \frac{\rho_{br}}{\rho_{bulk}}, \qquad (5.14)$$

де ρ_{br} – щільність брикету, г/см^3.

Однак, рівняння (5.13) не може бути застосовано для визначення параметрів ущільнення в діапазоні низького тиску (до 5 МПа), який характерний для умов виходу матеріалу з шнекового підпресовника. Тому, для опису поведінки матеріалу в шнековому підпресовнику в даній роботі прийнято використовувати експонентну функцію у вигляді:

$$p = a \cdot e^{(c \cdot Ky)} + b, \qquad (5.15)$$

де *a*, *b* и *c* – коефіцієнти в рівнянні апроксимації кривої пресування дрібнофракційної шихти, аналогічні коефіцієнтам в вираженні (5.13).

Для забезпечення стабільності процесу брикетування в валковому пресі з використанням шнекового підпресовника важливе дотримання умови сталості масової витрати шихти, що брикетується, тобто відповідність продуктивності валків преса та підпресовника [190]:

$$Q_{pr} = Q_{scr}, \tag{5.16}$$

де Q_{pr} – продуктивність валкового преса, т/ч; Q_{scr} – продуктивність шнекового підпресовника, т/ч;

$$Q_{pr} = Q_{scr} = k_Q \cdot Q_{scr.req}, \tag{5.17}$$

де $Q_{scr.req}$ – необхідна продуктивність шнекового підпресовника, т/ч; k_Q – коефіцієнт запасу продуктивності [190];

$$k_Q = 8640 / T_e, \tag{5.18}$$

де 8640 – число годин на рік; T_e – число годин роботи преса в рік.

Як правило, значення k_Q знаходиться в межах 1,1…1,5 [191], тому в роботі, з урахуванням практики експлуатації валкових пресах в реальних виробничих умовах, прийнято k_Q =1,1.

Необхідна продуктивність шнекового підпресовника:

$$Q_{scr.req} = \frac{\pi \cdot (D_{scr}^2 - d_{scr}^2) \cdot (S_{scr} - S_0) \cdot \eta_3 \cdot 60 \cdot n_{scr} \cdot \psi \cdot \rho_{bulk}}{4 \cdot 10^9}, \tag{5.19}$$

де D_{scr} – зовнішній діаметр шнека, мм; d_{scr}– внутрішній діаметр шнека (діаметр вала шнека), мм; S_{scr} – крок гвинтової лінії шнека, мм; S_0 – товщина стрічки шнека в напрямку осі, мм; η_3 – коефіцієнт, що враховує осьове просування шихти в залежності від кута нахилу гвинтової лінії шнека; n_{scr} – частота обертання шнека, мин$^{-1}$; $\psi \leq 1$ – коефіцієнт заповнення витків шнека,

$$\eta_3 = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2}; \tag{5.20}$$

η_1 – коефіцієнт, що враховує осьове просування шихти в залежності від кута нахилу гвинтової лінії шнека на діаметрі D_{scr}:

$$\eta_1 = \frac{\mathrm{Cos}\,\alpha_D \cdot \mathrm{Cos}(\alpha_D + \varphi_1)}{\mathrm{Cos}\,\varphi_1 + \mathrm{Sin}\,\alpha_D \cdot \mathrm{Sin}(\alpha_D + \varphi_1)}; \tag{5.21}$$

η_2 – коефіцієнт, що враховує осьове просування шихти в залежності від кута нахилу гвинтової лінії шнека на діаметрі d_{scr}:

$$\eta_2 = \frac{\mathrm{Cos}\,\alpha_d \cdot \mathrm{Cos}(\alpha_d + \varphi_1)}{(1 + f_s / f_c) \cdot \mathrm{Cos}\,\varphi_1}, \tag{5.22}$$

α_D – кут нахилу гвинтової лінії шнека на зовнішньому діаметрі D_{scr}; α_d – кут нахилу гвинтової лінії шнека на внутрішньому діаметрі d_{scr}; φ_1 – кут зовнішнього тертя, що визначає напрямок руху шихти в шнеку; f_s – динамічний коефіцієнт тертя шихти о стрічку шнека; f_c – динамічний коефіцієнт тертя шихти о корпус піпдресовника.

З огляду на дані роботи [192] і те, що переміщення шихти вздовж стрічки шнека і корпусу підпресовника визначаються умовами зовнішнього тертя прийнято припущення:

$$f_s = f_c \approx 0,7\, f_1; \tag{5.23}$$

Крок гвинтової лінії шнека:

$$S_{scr} = \pi \cdot D_{scr.e} \cdot tg\alpha_e, \tag{5.24}$$

$D_{scr.e}$ – ефективний діаметр шнека, мм; α_e – кут нахилу гвинтової лінії шнека на ефективному діаметрі, град:

$$\alpha_e = arctg \frac{S_{scr}}{\pi \cdot D_{scr.e}}. \tag{5.25}$$

Ефективний діаметр шнека:

$$D_{scr.e} = \sqrt{\frac{D_{scr}^2 + d_{scr}^2}{2}}, \tag{5.26}$$

Значення кутів α_D, α_D та φ_1 визначається наступним чином:

$$\alpha_D = arctg \frac{S_{scr}}{\pi \cdot D_{scr}};\ \alpha_d = arctg \frac{S_{scr}}{\pi \cdot d_{scr}};\varphi_1 = arctg \frac{f_c}{\pi \cdot D_{scr}} \tag{5.27}$$

Тиск в шихті після виходу з шнека на ділянці захоплення матеріалу валками преса є тиск попереднього ущільнення шихти і визначається відповідно до виразу:

$$p_{scr} = p_{pc} = p_0 \cdot e^{-\frac{\left[b_{scr} \cdot f_c \cdot \cos\omega - (b_{scr} + 2 \cdot h_{scr} + b_{scr} \cdot f_c \cdot \sin\omega) \cdot f_s\right]}{b_{scr} \cdot h_{scr} \cdot \sin\alpha_e} \cdot l_{scr}}, \tag{5.28}$$

h_{scr} – висота витка шнека, мм; b_{scr} – ширина витка шнека, мм:

$$b_{scr} = \pi \cdot D_{scr.e} \cdot \mathrm{Sin}\,\alpha_e, \tag{5.29}$$

p_0 – початковий тиск в шихті на ділянці входу в шнек підпресовника, МПа:

$$p_0 = h_{bulk} \cdot \rho_{bulk}, \tag{5.30}$$

h_{bulk} – висота стовпа шихти над входом в шнек, мм;

ω – кут між напрямком руху шихти і поверхнею гвинтовий лінії шнека, град:

$$\omega = arctg \frac{\cos^2 \alpha_e - 0{,}5}{\sin 2\alpha_e}, \tag{5.31}$$

l_{scr} – довжина шнека, мм

Вираз (5.28) виведено на основі аналітичних досліджень, представлених в роботах [193].

Коефіцієнт ущільнення шихти в валковому пресі з використанням шнекового підпресовника:

$$Ky_{br} = Ky_{pc} \cdot Ky_{roll}, \tag{5.32}$$

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 [78]:

$$Ky_{roll} = 1 + \frac{D_0 \cdot (1 - \cos \alpha_{pr})}{H_{br}}, \tag{5.33}$$

де D_0 – приведений діаметр валків преса, мм; H_{br} – товщина брикету на лінії центрів валків, мм; α_{pr} – кут пресування, град.

Для умов роботи преса з шнековим підпресовником прийнято:

$$\alpha_{pr} = \alpha_0 . \tag{5.34}$$

Визначивши величину ущільнення шихти валками згідно виразів (5.33) з використанням значень геометричних параметрів валків, формуючих елементів преса і виразів (5.15, 5.23, 5.26-5.30) стає можливим визначення величини попереднього ущільнення Ky_{pc}:

$$Ky_{pc} = \frac{1}{c} \cdot \log\left(\frac{a}{p_{pc} - b} \right), \tag{5.35}$$

Щільність брикетів з урахуванням пружної післядії:

$$\rho_{br.1} = \frac{Ky_{br} \cdot \rho_{bulk}}{\frac{\delta_V}{100} + 1}, \tag{5.36}$$

де δ_V – пружна післядія, %.

Для оцінки ефективності прийнятої конструкції шнека запропонована наступна умова:

$$p_{\max} \geq 10 \cdot p_{pc} . \tag{5.37}$$

при цьому

$$l_{scr} \leq 5 \cdot S_{scr} . \tag{5.38}$$

Якщо умови (5.36, 5.37) не виконуються, необхідно виконати оцінку і аналіз відхилення і провести коригування параметрів α_e та l_{scr}.

Коли умови (5.37 та 5.38) задоволені, то визначаються енергосилові параметри підпресовника:

Осьове зусилля на шнеку, Н:

$$F_{axis} = \frac{\pi \cdot (D_{scr}^2 - d_{scr}^2)}{4} \cdot p_{pc}. \quad (5.39)$$

Сила тертя в підпресовнику, Н:

$$F_f = \frac{\pi \cdot (D_{scr}^2 - d_{scr}^2)}{4} \cdot \frac{l_{scr}}{S_{scr}} \cdot \frac{p_{pc} + p_0}{2} \cdot f_c. \quad (5.40)$$

Момент на валу шнека, Н×м:

$$M_{scr} = (F_{axis} \cdot tg\alpha_e + F_f) \cdot \frac{D_{scr} + d_{scr}}{2} \cdot 10^{-3}. \quad (5.41)$$

Момент на валу електродвигуна підпресовника, Н×м:

$$M_{elm} = \frac{M_{scr}}{u_{scr.drive}}, \quad (5.42)$$

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

Потужність, споживана підпресовником, кВт:

$$N_{scr} = \frac{\pi \cdot M_{scr} \cdot n_{scr} \cdot 10^{-3}}{30 \cdot \eta_{scr}}. \quad (5.43)$$

У відповідність з виразами (5.1-5.43) складено алгоритм розрахунку і аналізу конструктивних, енергосилових та технологічних параметрів підпресовника, наведений рис. 5.2. [194].

5.2. Дослідження зв’язків між параметрами шнекового підпресовника

На основі запропонованого алгоритму (рис. 5.2) виконані розрахунково-аналітичні дослідження параметрів шнекового підпресовника для умов брикетування бурого вугілля, торфу та лігніну гідролізного. Дані матеріали прийняті, виходячи з таких міркувань:

- мала насипна щільність (<1,0 г/см^3);
- значення максимально коефіцієнта ущільнення, що досягається – $Ку$>2,0;
- є матеріалами, часто застосовними в металургії і енергетиці в брикетованому вигляді в якості альтернативних джерел теплової енергії;
- відрізняються між собою за фізико-механічними властивостями, що визначає їх поведінку при брикетуванні в валкових пресах.

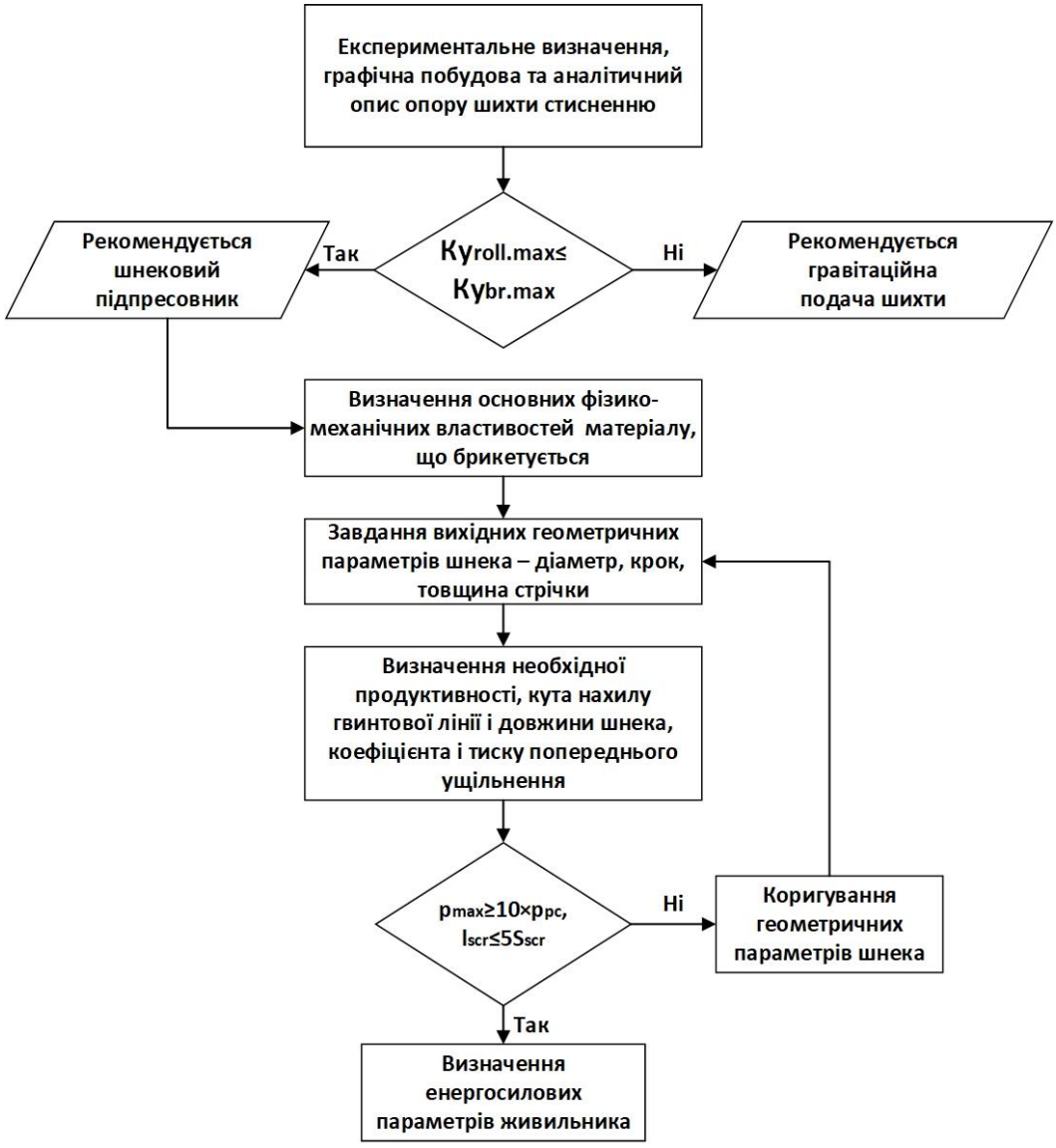


Рисунок 5.2 – Алгоритм розрахунку та аналізу конструктивних, технологічних і енергосилових параметрів шнекового підпресовника валкового преса

У табл. 5.1 наведені значення основних фізико-механічних характеристик прийнятих для дослідження матеріалів, які визначають їх поведінку при брикетуванні, та які використовують при розрахунках технологічних та енергосилових параметрів валкових пресів.

Таблиця 5.1 – Фізико-механічні характеристики досліджуваних матеріалів

Характеристика	Матеріал		
	Буре вугілля з органо-мінеральним сполучним	Торф	Лігнін гідролізний
Фракція, мм	0…-5	0…-3	0…-5
Коефіцієнти рівняння опору стисненню $p = a \cdot e^{(-c \cdot Ky)} + b$	a =0,01108; b =-1,549; c =-4,369	a = 0,1495; b = -2,002; c = -2,058	a = 0,7416; b = -5,004; c = -1,66
Пікнометричним щільність частинок ρ_{pikn}, г/см^3	1,7	1,55	1,50
Насипна щільність ρ_{bulk}, г/см^3	0,74	0,43	0,48
Пружна післядія (середнє значення)δ_V, %	22,6	22,4	19,9
Коефіцієнт зовнішнього тертя f_1	0,577	0,780	0,85
Коефіцієнт внутрішнього тертя f_2	0,973	0,973	0,95
Коефіцієнт бокового тиску ξ	0,178	0,178	0,184

У розрахунках враховані наступні параметри валків преса:

- конфігурація формуючих елементів зубчасто-жолобчаста;
- розміри формуючого елемента – 40х38,5х17,5мм;
- наведений діаметр валків – 630,5, мм;
- ширина робочої поверхні валків – 200, мм;
- товщина брикету (без врахування пружної післядії) – 17,5, мм;
- зазор між валками – 0,5, мм.

Конструктивні та робочі параметри шнекового підпресовника:

- зовнішній діаметр шнека –169 мм;
- діаметр валу шнека – 60 мм;
- робоча довжина шнека – 400, мм;

- товщина стрічки шнека середня – 4 мм;
- крок витків шнека – 100…140 мм;
- передавальне число приводу підпресовника – 8,3;
- коефіцієнт корисної дії приводу підпресовника – 0,96, %;
- частота обертання шнека – 112, мин$^{-1}$;
- коефіцієнт заповнення витків шнека – 0,8.

З використанням виразів (5.1-5.43) для прийнятих параметрів валків і шнека проведені розрахунки та отримані масиви даних, які дозволяють зробити аналіз взаємозв'язків енергосилових і технологічних параметрів роботи прийнятого в роботі шнекового підпресовника при брикетуванні матеріалів, зазначених у табл. 5.1.

В результаті розрахунково-аналітичних досліджень встановлено, що для брикетування прийнятого для досліджень бурого вугілля з органо-мінеральним сполучним при зазначених геометричних параметрах валків і формуючих елементів не потрібно застосування шнекового підпресовника. Шихта на основі бурого вугілля в даному варіанті може бути ущільнена валками до максимально можливої для неї міри ущільнення. Так, максимальне теоретично розраховане значення коефіцієнта ущільнення, виходячи з умов захоплення матеріалу валками, становить $Ку_{roll.max}$=2,61. При цьому, максимально можливий коефіцієнт ущільнення для даної шихти становить $Ку_{br.max}$=2,29. Таким чином, даний матеріал може брикетуватися в валковому пресі з гравітаційною подачею шихти в осередок деформації без використання шнекового підпресовника. При цьому, якщо не обмежувати подачу матеріалу в міжвалковий простір, будуть створюватися умови для перевантаження деталей та вузлів преса, так як за умовами захоплення матеріалу валками прес буде прагнути ущільнити матеріал до $Ку_{roll.max}$=2,61, а граничним значенням, є, як показано раніше $Ку_{br.max}$=2,29. Тобто, буде відбуватися «заклинювання» в осередку деформації, що супроводжується різким зростанням зусилля та моменту пресування. Тому при брикетуванні даного матеріалу для отримання якісних брикетів та недопущення перевантаження деталей і вузлів преса необхідно обмежувати подачу матеріалу

в осередок деформації таким чином, щоб максимальний ступінь ущільнення не перевищував $Ky_{br.max}$=2,29.

Для досліджуваних торфу лігніну отримані наступні дані.

Основним параметром, що визначає ефективність застосування шнекового підпресовника валкового преса, є величина створюваного тиску попереднього ущільнення і ступінь його корисного впливу на загальну величину ущільнення шихти в валковому пресі. На величину попереднього ущільнення істотно впливає висота стовпа шихти на вході в шнек. Графіки на рис. 5.3 і 5.4 дозволяють оцінити вплив стовпа шихти на вході в шнек на характеристики ущільнення шихти.

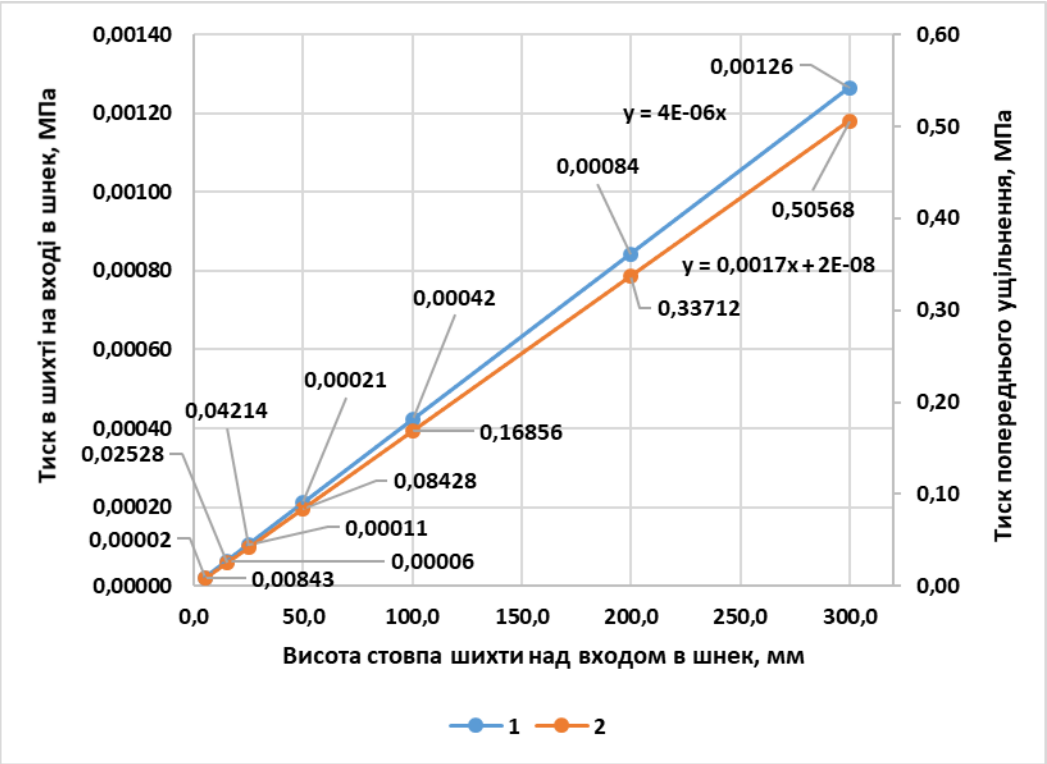
Дані рис. 5.3 наочно показують, що зі збільшенням рівня стовпа шихти збільшується тиск на вході в шнек, що, в свою чергу, покращує заповнення шнекової порожнини і істотно збільшує тиск попереднього ущільнення шихти на ділянці захоплення валками.

Тиск попереднього ущільнення на межі виходу матеріалу зі шнека та його захоплення валками і тиск пресування в осередку деформації валкового преса визначають загальну величину ущільнення шихти, виражену коефіцієнтом ущільнення.

На рис. 5.4 наведені графіки, які дозволяють оцінити внесок шнекового підпресовника в загальне значення величини коефіцієнта ущільнення шихти в валковому пресі. Дані графіки показують, що використання шнекового підпресовника дозволяє підвищити величину коефіцієнта ущільнення досліджуваного торфу, в середньому, на 22...27%, а гідролізного лігніну – на 14...17%.

Такі значення приросту величини ущільнення є суттєвими і, як показує практика, дозволяють отримати якісні брикети. У той час, при відсутності шнекового підпресовника брикети з досліджуваних торфу та лігніну на валковому пресі отримати не вдавалося.

а



б

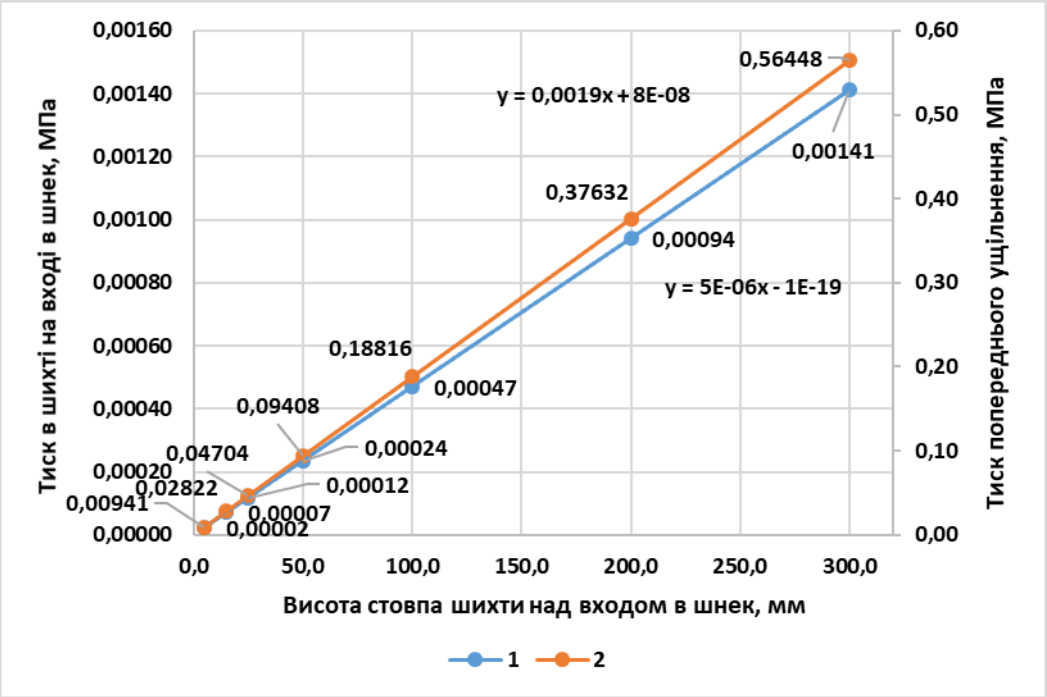


Рисунок 5.3 – Вплив величини стовпа шихти перед шнеком на тиск в шихті на вході в шнек і на ділянці захоплення матеріалу валками

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

В ході розрахунково-аналітичних досліджень встановлено, що при відсутності підпору, коли пропускна здатність підпресовника та валків узгоджені, крок шнека практично не впливає на величину тиску попереднього ущільнення, вона більшою мірою обумовлюється фізико-механічними властивостями шихти та величиною її стовпа на вході в шнек.

Однак, зміна кроку витків шнека впливає на продуктивність шнека і на величину сили тертя шихти об стінки корпусу підпресовника, а, отже, і на енергосилові параметри його приводу.

Так, на рис. 5.5 і 5.6 в графічному вигляді представлені зв’язки моменту на валу шнека від величини його кроку для досліджуваних матеріалів (торф, гідролізний лігнін) та для різної величини стовпа шихти над входом в шнек.

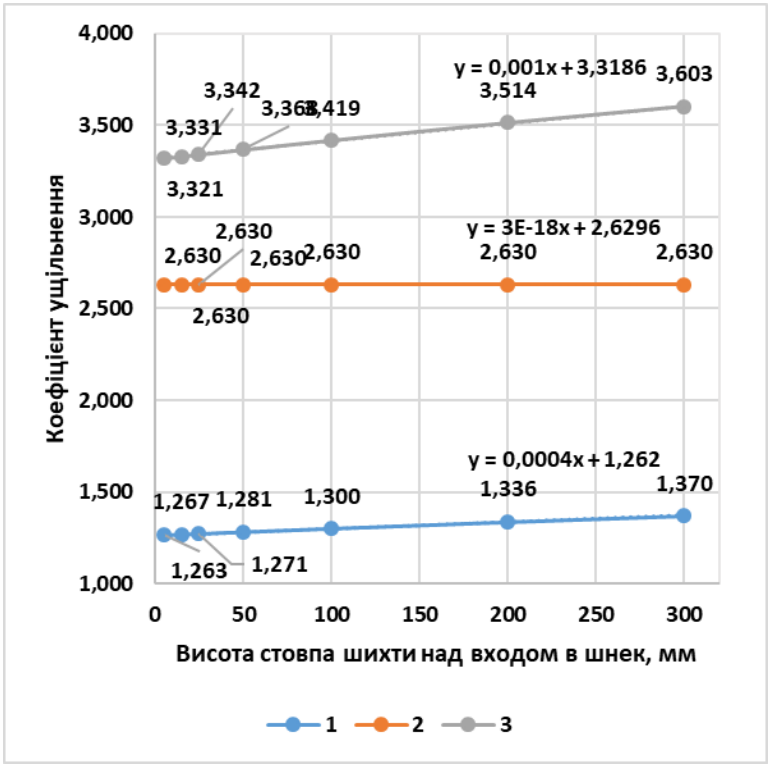
Дані графіки вказують, що зі збільшенням висоти стовпа шихти над входом в шнек момент, який необхідно здолати шнеку, збільшується, а вплив кроку шнека на величину крутного моменту на валу шнека проявляється більш чітко. При цьому криві, наведені на рис. 5.5, 5.6, з високою точністю описуються ступеневими, експонентними та логарифмічними рівняннями, що дозволяє застосовувати їх для побудови прогнозних моделей роботи шнекових підпресовників валкових пресів.

Апроксимація та аналіз кривих, представлених на рис. 5.5, 5.6 рівняннями ступеневого типу:

$$M_{scr} = a_{l.scr} \times S_{scr}^{b.batch}, \qquad (5.44)$$

дозволили встановити, що коефіцієнт $a_{l.scr}$ характеризує в інтегральному вигляді вплив конструктивних параметрів шнекового підпресовника, а коефіцієнт $b.batch$ – відображає вплив фізико-механічних властивостей шихти, яка брикетується.

а



б

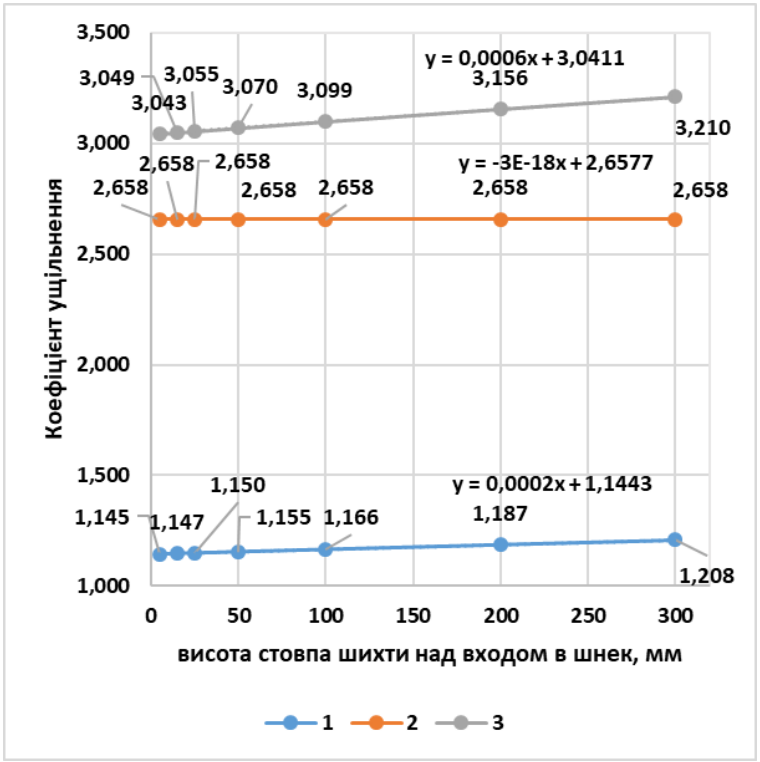


Рисунок 5.4 – Вплив стовпа шихти перед шнеком на величину ущільнення шихти

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

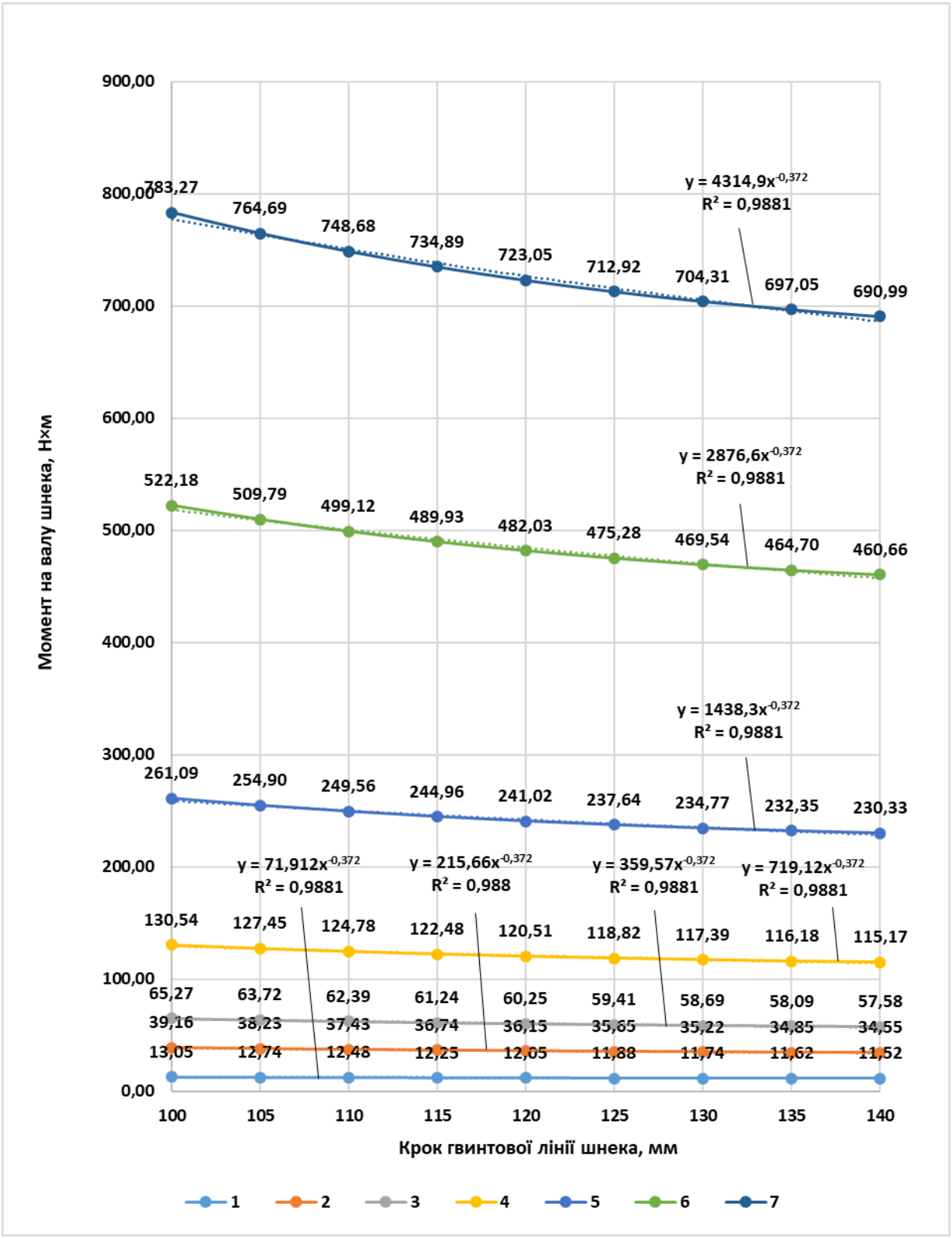


Рисунок 5.5 – Зв'язок величини моменту на валу шнека з кроком гвинтової лінії

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

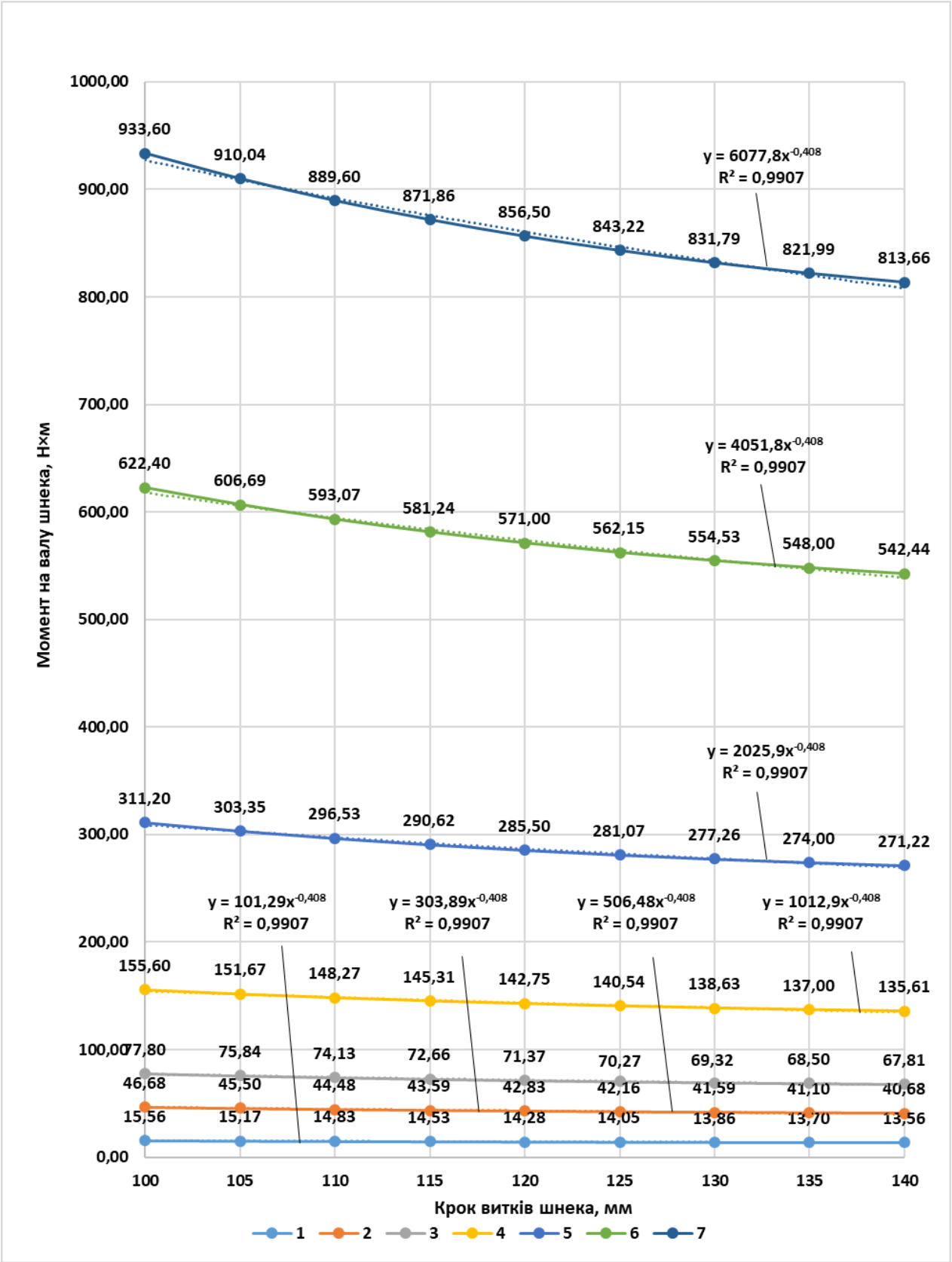
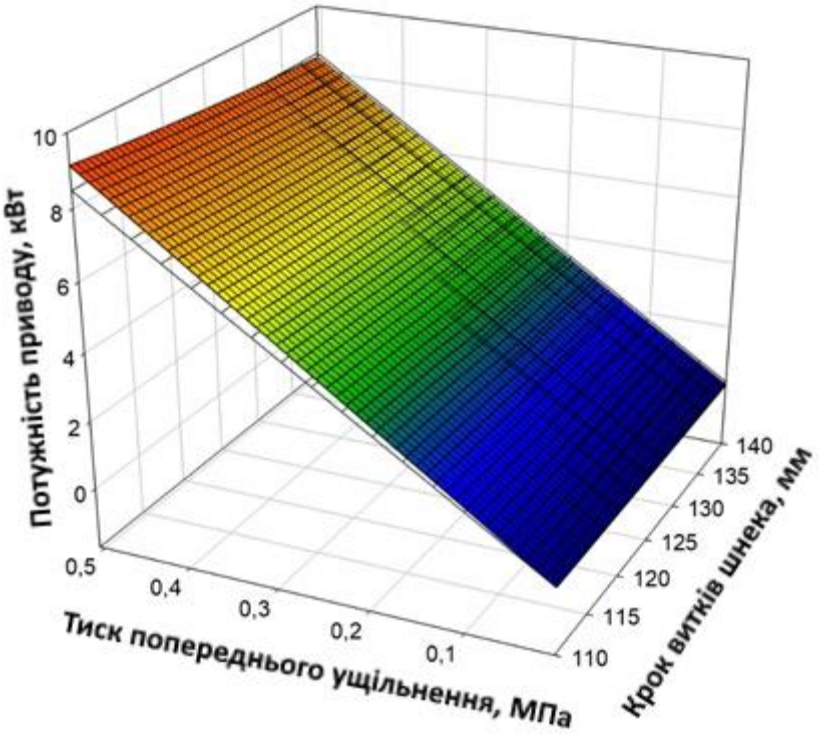


Рисунок 5.6 – Зв'язок величини моменту на валу шнека з кроком гвинтової лінії

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 – лігнін

а



б

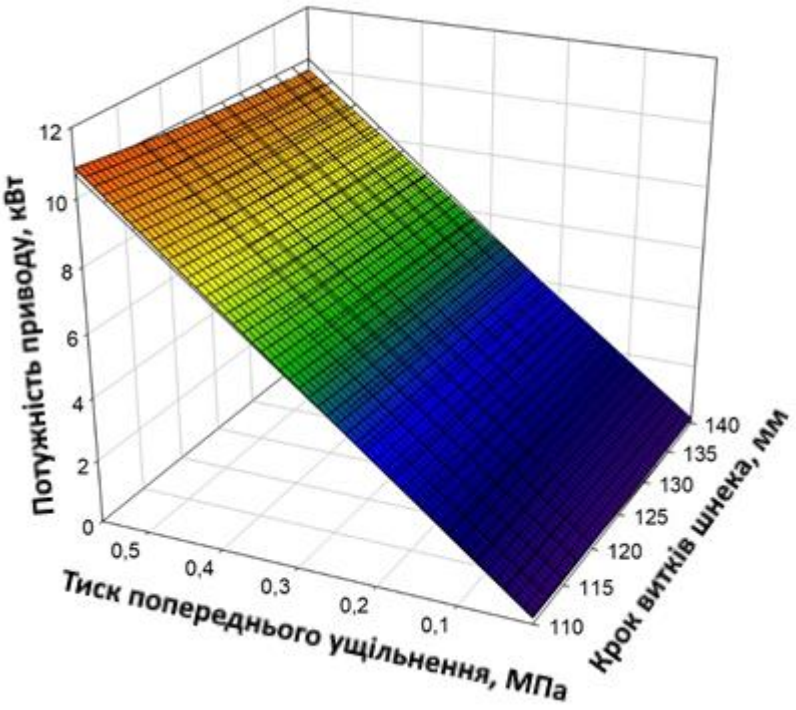
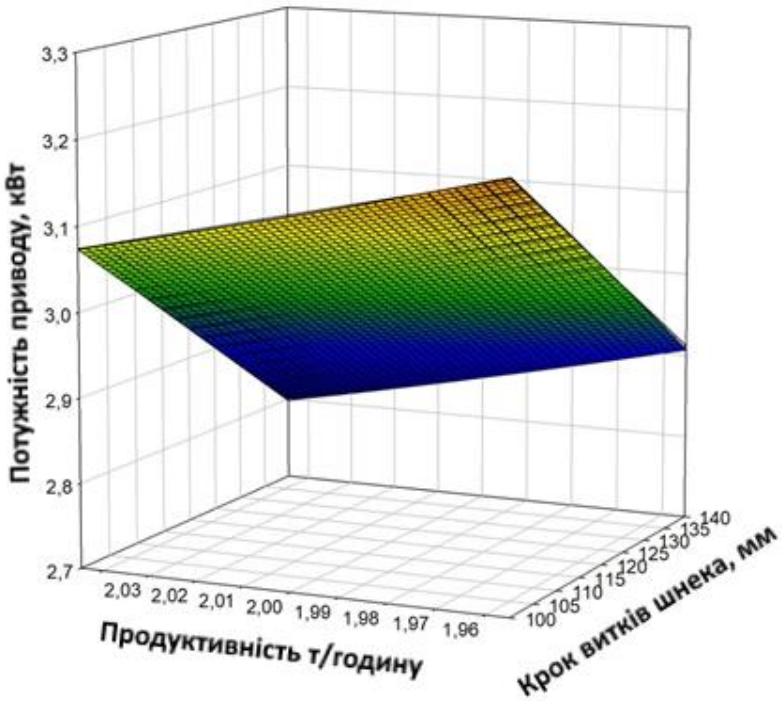


Рисунок 5.7 – Зв'язок потужності приводу підпресовника, кроку гвинтової лінії шнека та тиску попереднього ущільнення

а – торф; б – лігнін

висота стовпа шихти над входом в шнек – 100 мм;

а



б

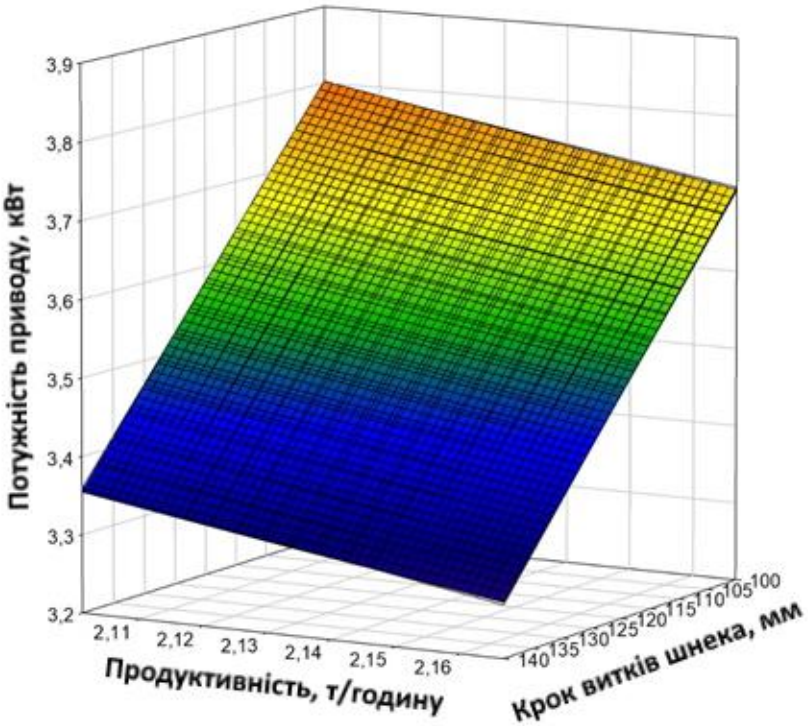


Рисунок 5.8 – Зв'язок потужності приводу підпресовника, кроку гвинтової лінії шнека та продуктивності підпресовника

а – торф; б – лігнін

висота стовпа шихти над входом в шнек – 100 мм;

Графічно представлені на рис. 5.7 а, б залежності описуються наступними аналітичними виразами, відповідно:

$$N_{scr} = 6{,}3691\text{-}0{,}0069 \times Q_{scr}\text{-}1{,}2737 \times p_{pc},\ R^2 = 0{,}97; \quad (5.45)$$

$$N_{scr} = 1{,}4364 - 0{,}0120 \times S_{scr} + 18{,}6909 \times p_{pc},\ R^2 = 0{,}99. \quad (5.46)$$

Графічно представлені на рис. 5.8 а, б залежності описуються наступними аналітичними виразами, відповідно:

$$N_{scr} = 7{,}8405\text{-}0{,}0110 \times Q_{scr}\text{-}1{,}3983 \times S_{scr},\ R^2 = 0{,}99; \quad (5.47)$$

$$N_{scr} = 7{,}8405\text{-}0{,}0110 \times Q_{scr}\text{-}1{,}3983 \times S_{scr},\ R^2 = 0{,}99. \quad (5.48)$$

Побудова графічних залежностей по типу тих, що представлені на рис. 5.7, 5.8 та їх опис з використанням аналітичних виразів (5.47, 5.48) дозволяє прогнозувати зміну енергосилових і технологічних параметрів (тиску попереднього ущільнення і потужності приводу т.д.) шнекових підпресовників з урахуванням фізико-механічних властивостей шихти і конструктивних параметрів шнека. Подібні прогнозні моделі з використанням створеного в роботі розрахунково-аналітичного апарату можу бути побудовані і для інших варіацій параметрів шнекових підпресовників, наприклад, в таких координатах:

- тиск попереднього ущільнення - крок витків шнека - момент на валу шнека;
- величина стовпа шихти над входом в шнек - крок витків шнека - тиск попереднього ущільнення;
- величина стовпа шихти над входом в шнек - крок витків шнека - момент на валу шнека / потужність приводу підпресовника і т.п.

Представлені в розділі напрямки використання графоаналітичного методу дозволять здійснювати обґрунтований вибір раціональних конструктивних і технологічних параметрів шнекових підпресовників валкових пресів.

5.3. Промислове дослідження процесу брикетування на валковому пресі з використанням шнекового підпресовника

В процесі практичних робіт зі створення та впровадження на виробництві валкових пресів з шнековими підпресовниками [195] фахівцями ІЧМ були отримані практичні дані, представлені в табл. 5.2. Випробування шнеків проводилися на дослідно-промисловому валковому пресі, загальний вигляд якого представлений на рис. 5.9. Метою даних випробувань було відпрацювання режимів пресування дрібнофракційних матеріалів з малою насипною щільністю (≤1,0 г/см^3) та напрацювання практичного матеріалу для виготовлення та промислового впровадження валкових пресів, оснащених шнековими подпрессовщікамі для виробництва паливних брикетів. Прес, на якому проводилися випробування шнекового підпресовника, оснащений валками діаметром 648 мм з шириною пресуючих поверхонь 200 мм. Основні конструктивні параметри підпресовника, за винятком змінюваної довжини шнека, відповідали зазначеним раніше в даному розділі роботи.

На рис. 5.10 наведено загальний вигляд торфу та отриманих з нього брикетів на валковому пресі з використанням шнекового підпресовника в ході дослідно-промислових випробувань. Приблизно аналогічний вид мали сировина та брикети з досліджуваних бурого вугілля та гідролізного лігніну.

З причини обмеженості кількості шихтових матеріалів і того, що дані отримані не вході заздалегідь спланованих експериментів, а при тестуванні процесу брикетування при виготовлені шнекових підпресовників для промислових підприємств, дані таблиці 5.2 важко привести до строго впорядкованого вигляду.

Однак, з огляду на складність отримання практичних відомостей про роботу шнекових підпресовників валкових пресів, навіть ця обмежена інформація в поєднанні з раніше проведеними в роботі теоретичними дослідженнями дозволяє оцінити правильність вибору теоретичних положень та відповідність результатів розрахунково-аналітичного дослідження з показниками роботи реально діючого обладнання.

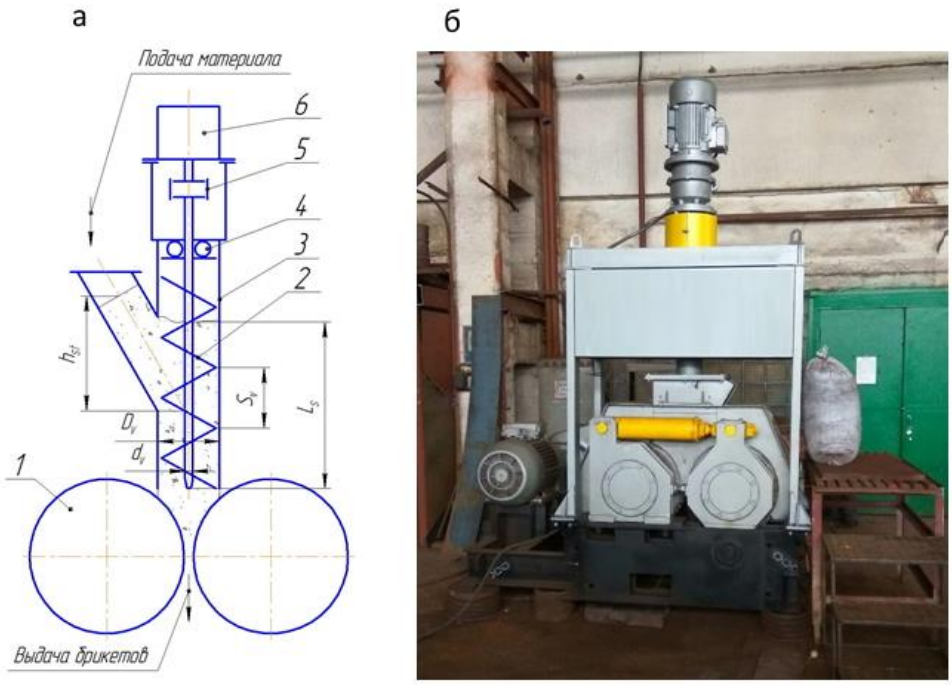


Рисунок 5.9 – Валковий прес конструкції ІЧМ, оснащений шнековим підпресовником

а – принципова схема; б – загальний вигляд

1 – прес валковий; 2 – шнек; 3 – корпус; 4 – підшипник упорний; 5 – муфта зубчаста; 6 – мотор-редуктор

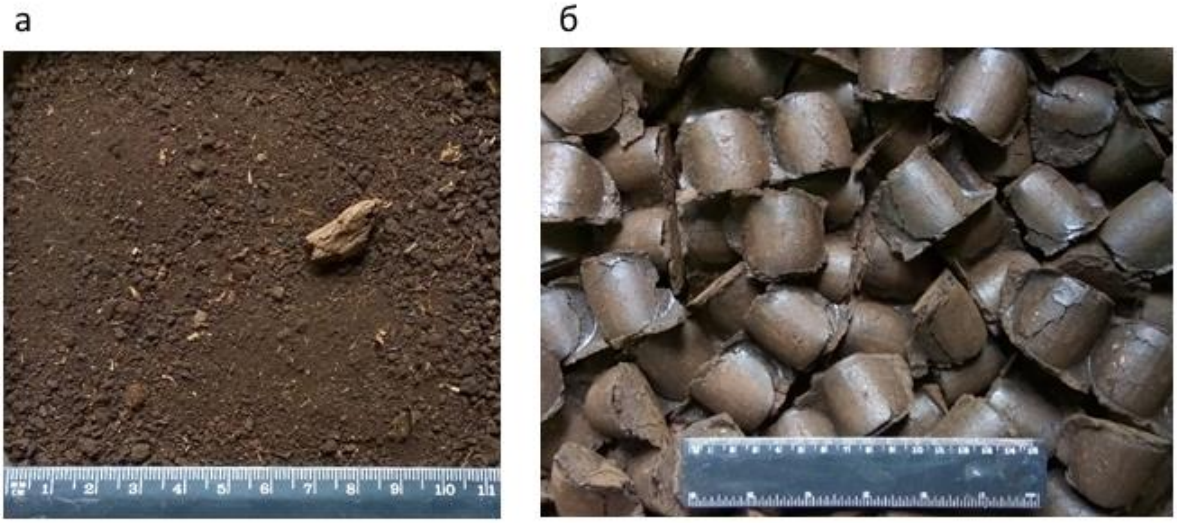


Рисунок 5.10 – Загальний вигляд сировини і продукту брикетування

а - торф; б - торф'яні брикети, отримані на валковому пресі

Таблиця 5.2 – Дослідно-промислове пресування на валкових пресах з використанням шнекових підпресовників

№ п/п	Номер типу шнека	Середнє значення кроку шнека, мм	Кількість витків шнека	Матеріал	Об'єм порції матеріалу, м^3	Частота обертання шнека, мин$^{-1}$	Експериментальні дані				Розрахункові дані			
							Щільність брикетів, г/см^3	Момент на валу ел. двигуна підпрес-совника, Н×м	Момент на валу шнека підпрес-совника, Н×м	Потужність, що споживається приводом, кВт	Щільність брикетів, г/см^3	Момент на валу ел. двигуна підпрес-совника, Н×м	Момент на валу шнека підпрес-совника, Н×м	Потужність, що споживається приводом, кВт
1	1	91,16	7	Торф (О)	0,030…0,040	112	1,16…1,18	14,0…14,5	119,56…123,83	1,46…1,51	1,17…1,18	11,62…13,42	96,43…111,34	1,18…1,36*
2	1	91,16	7	Торф (О)	0,040…0,060	112	1,16…1,18	14,5…15,0	123,83…128,10	1,51…1,56	1,18	13,42…20,12	111,34…167,02	1,36…2,04*
3	1	91,16	7	Торф (О)	0,060…0,080	112	1,16…1,18	15,0…18,0	128,10…153,72	1,56…1,87	1,18…1,19	20,12…26,83	167,02…222,69	2,04…2,72*
4	1	91,16	7	Лигнин	0,030…0,040	112	1,03…1,24	15,0…17,0	128,10…145,01	1,56…1,77	1,22	13,97…16,13	115,91…133,84	1,42…1,64*
5	2	121,30	7	Лигнин	0,030…0,040	112 (п/п)	1,24…1,27	35,5…42,5	294,65…362,95	3,59…4,43	1,22…1,23	19,40…22,40	161,03…185,93	1,97…2,27*
5	4	150,00	6	Лигнин	0,030…0,040	112 (п/п)	1,21…1,24	41,0…43,0	350,14…367,22	4,28…4,48	1,23	19,96…21,89	157,36…181,72	1,92…2,22*
9	7	132,80	4,5	Лигнин	0,030…0,040	112 (п/п)	1,21…1,24	21,0…26,0	179,34…298,90	2,13…3,65	1,22	9,84…11,3	81,65…94,28	1,0…1,15
10	8	126,40	3,5	Лигнин	0,030…0,040	112 (п/п)	1,21…1,24	12,0…15,0	99,60…136,64	1,21…1,67	1,22	6,00…6,92	49,77…57,47	0,61…0,70
11	9	118,00	2,5	Лигнин	0,030…0,040	112 (п/п)	1,00…1,10	9,0…10,0	76,86…85,40	0,94…1,04	1,21	3,12…3,61	25,91…29,92	0,32…0,37
12	10	136,70	4,5	Лигнин	0,030…0,040	112 (п/п)	1,21…1,24	23,0…24,0	196,42…204,96	2,39…2,50	1,22…1,23	10,2…11,78	84,69…97,78	1,03…1,19

п/п - в процесі запуску преса здійснено попередній підпір шихти;

* Занадто велика довжина шнека, рекомендується відкоригувати параметри α_e та l_{scr}.

Особливістю проведених випробувань реального промислового обладнання було те, що вони проводилися в двох режимах роботи підпресовника:

1. Без попереднього підпору шихти – підпресовник працює в штатному режимі, тобто перешкоджає витісненню матеріалу з осередку деформації та створює тиск попереднього ущільнення, достатній для досягнення необхідного ступеня ущільнення шихти. У цьому варіанті, як видно з даних табл. 5.2., експериментальні і розрахункові значення енергосилових параметрів мали допустиму розбіжність, а значення щільності брикетів – мінімальну, що чітко підтверджує правильність прийнятих теоретичних положень.
2. З попереднім підпором шихти – коли підпресовник включали в роботу раніше, ніж валки преса. Це робилося навмисне для створення, так званої «початкової пробки», за аналогією з мундштучним пресуванням. Затримка становила 2...3 сек. За цей час в міжвалковий простір нагніталася невелика порція матеріалу. При цьому під час пуску валків спостерігалося короткочасне перевантаження приводу, що не призводило до його аварійного відключення, надалі прес виходив на номінальний режим роботи. Такий спосіб дозволив збільшити ступінь ущільнення шихти, але при цьому спостерігалося істотне зростання енергосилових параметрів. Збільшення енергосилових параметрів при пресуванні з початковим підпором і досягнення необхідної щільності свідчить про те, що при роботі в штатному режимі для досягнення зазначених показників слід збільшити продуктивність шнека шляхом підвищення частоти обертання валків преса. Так, на основі підпресовника, використовуваного в даній роботі з номінальною частотою обертання шнека 112 $хв^{-1}$, була створена модифікація з номінальною частотою обертання шнека 140 $хв^{-1}$, що дозволяє розширити технологічні можливості управління процесом брикетування.

Висновки

1. Розроблено розрахунково-аналітичний метод, що дозволяє зробити визначення та оцінку впливу конструктивних параметрів шнека і фізико-

механічних характеристик шихти, що брикетується, на параметри ущільнення та енергосилові характеристики роботи шнекового підпресовника валкового преса. Розроблено алгоритм використання зазначеного методу.

2. З урахуванням фізико-механічних властивостей шихти та геометричних параметрів осередку деформації шихти в міжвалковому просторі, сформульовані умови для визначення необхідності застосування шнекового підпресовника в складі конструкції валкового преса. Згідно з цими умовами шнековий підпресовник, або будь-який інший пристрій для примусової подачі та попереднього ущільнення шихти може використовуватися в складі валкового преса тоді, коли стає неможливим досягнення необхідного (або максимально можливого) ступеня ущільнення матеріалу при гравітаційній подачі матеріалу в міжвалковий простір.
3. Проведено розрахунково-аналітичні та промислові дослідження параметрів роботи шнекового підпресовника валкового преса. Отримано масив розрахункових та експериментальних даних, що дозволив підтвердити правильність прийнятих теоретичних положень і створеного в роботі методу.
4. Встановлено графічні та аналітичні зв'язки між конструктивними, енергосиловими та іншими технологічними параметрами шнекового підпресовника валкового преса, які можуть бути використані для вирішення завдань пошуку оптимальних конструктивних рішень.

РОЗДІЛ 6
РОЗВИТОК КОМПЛЕКСНОГО СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ДО ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ВАЛКОВОГО ПРЕССА З ВИКОРИСТАННЯМ ОСНОВНИХ ПОЛОЖЕНЬ ТЕОРІЇ ПРОЕКТУВАННЯ

6.1. Розвиток системного підходу до створення раціонального компонувального рішення конструкції валкового преса

Як показано в розділі 1, на сьогоднішній день не існує самостійних або інтегрованих в відомі САПР програмних засобів, що дозволяють з урахуванням всіх технологічних особливостей проводити розробку і моделювання всього життєвого циклу валкових брикетних пресів.

Перспективним для аналізу і розвитку засобів і методів проектування валкових пресів є застосування відомих в різних галузях знань структурно-параметричного синтезу і аналізу та розвиток засобів і методів формування нових моделей валкових пресів за модульним принципом з урахуванням вже відомих розробок.

Метою даного розділу є розвиток комплексного системного підходу до синтезу конструкції валкових пресів для брикетування дрібнофракційних сировинних матеріалів. Даний підхід є складовою частиною комплексного методу вибору раціональних конструктивних рішень валкових пресів, що проектуються за модульним принципом.

Виконаний в роботі аналіз та практичний досвід фахівців ІЧМ зі створення та експлуатації валкових пресів дозволяє прийти до думки, що комплексний підхід до вибору раціональної конструкції валкових пресів для брикетування може створюватися на базі основних підходів, що застосовуються для аналізу і створення ієрархічних структур, тобто на базі структурно-параметричного синтезу і аналізу [196-198].

У практиці моделювання та розробки нових машин і систем виділяються базові завдання:

- структурний синтез;
- структурний аналіз;
- параметричний синтез;
- параметричний аналіз.

На їх базі засновані комбіновані підходи:

- структурний синтез і аналіз;
- параметричний синтез і аналіз;
- структурно-параметричний синтез;
- структурно-параметричний аналіз.

Розробка узагальненої системи структурно-параметричного синтезу і аналізу валкового преса включає адаптацію до вирішуваних задач, компонування та спільне застосування наступних принципів створення і дослідження складних систем – модульний, об'єктно-орієнтована, ієрархічний, композиції і декомпозиції [156-158].

Стосовно створення нових моделей валкових пресів кількість і порядок вирішення зазначених вище завдань визначається вимогами, що пред'являються до даного устаткування за такими основними умовами:

- можливість реалізації стабільного процесу виробництва якісних брикетів відповідно до прийнятої технології;
- забезпечення заданої продуктивності;
- надійність і довговічність роботи - максимально можливий ресурс експлуатації деталей і вузлів преса;
- мінімально можливі значення металоємності, енергоємності та витрат на сервісне обслуговування;
- висока ремонтопридатність;
- оптимальні витрати на розробку, виготовлення преса, його деталей, вузлів і т.п.

На рис. 6.1 приведена узагальнена структура системного підходу до моделювання раціональної конструкції валкового преса, яка відображає основні етапи створення нової модифікації машини даного типу – синтез, аналіз і остаточне формування конструкції преса.

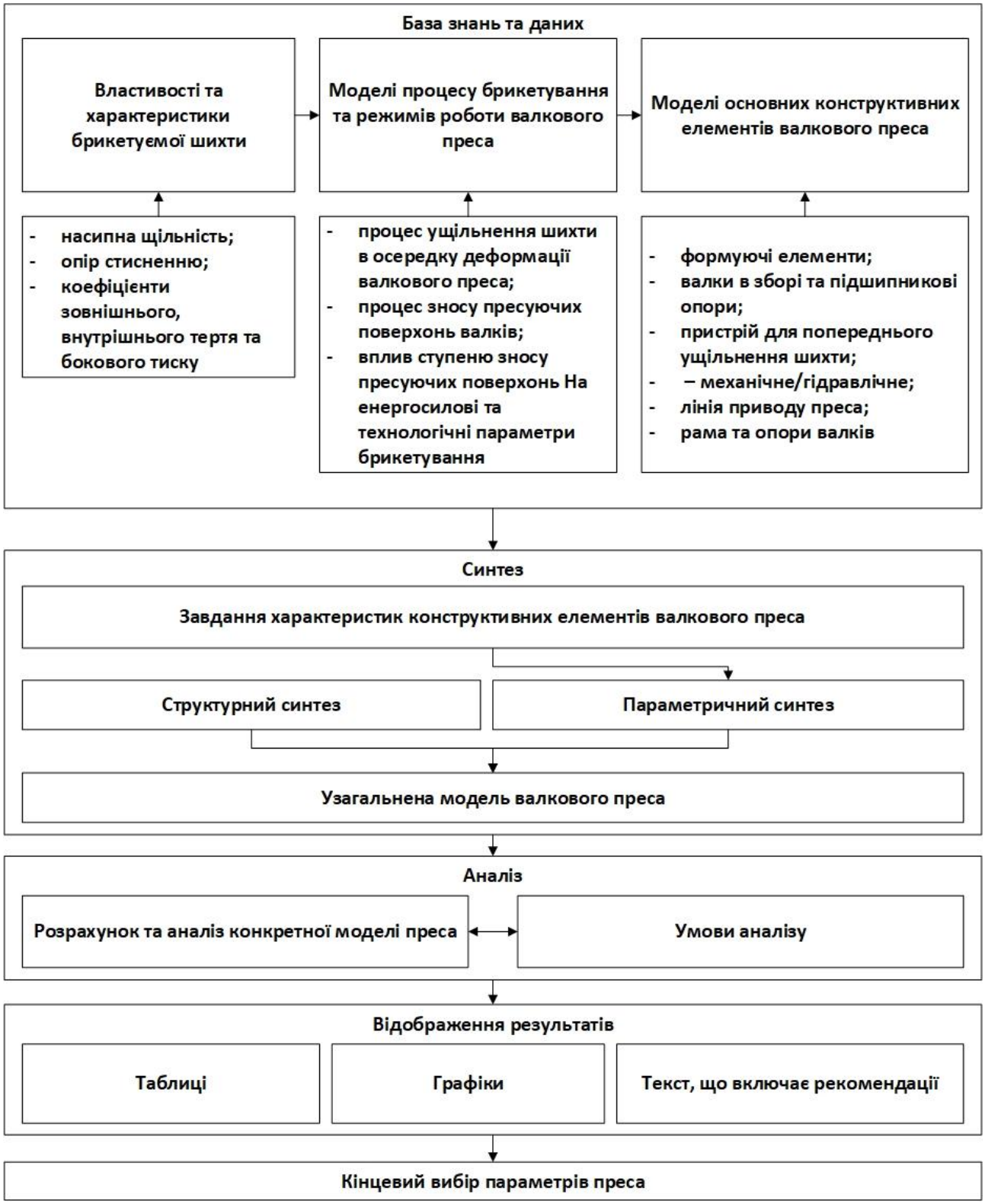


Рисунок 6.1 – Системний підхід до моделювання раціональної конструкції валкового преса

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.

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.

Практичний і теоретичний досвід співробітників ІЧМ по створенню валкових пресів і дослідженню процесу брикетування дозволяє розробити структуру системи моделювання раціональної конструкції валкових пресів.

Для реалізації даної структури використовуються масиви даних і знань (правила і розрахунково-аналітичні методи):

1. Фізико-механічні характеристики матеріалів, що брикетуються:
   - коефіцієнти зовнішнього, внутрішнього тертя і бічного тиску;
   - експериментально встановлений і математично описаний функціональний взаємозв'язок між тиском пресування і величиною ущільнення шихти;
   - характеристики пружної післядії в брикетах і т. п.
2. Моделі процесів, що відбуваються при роботі валкового преса:
   - модель процесу брикетування дрібнофракційних шихт в осередку деформації валкового преса;
   - модель процесу зношування робочої поверхні валків преса;
   - модель для оцінки впливу ступеня зносу робочих поверхонь валків преса на енергосилові і технологічні параметри брикетування;
   - модель пружної післядії в брикетах з урахуванням зміни формуючих елементів і т. п.
3. Моделі основних вузлів преса:

- модель валкового блоку;
- модель пристрою захисту валків від перевантажень;
- модель лінії приводу преса;
- модель підпресовника (якщо такий передбачений конструкцією виходячи з вимог технології брикетування).

На основі зазначених масивів даних і знань здійснюється структурний і параметричний синтез моделі валкового преса із завданням вхідних параметрів і визначенням значень параметрів основних конструктивних елементів та експлуатаційних характеристик преса.

Далі більш детально зупинимося на кожній окремо з раннє зазначених базових задач моделювання і розробки машин стосовно створення нових моделей валкових пресів для брикетування дрібнофракційних матеріалів.

Структурний синтез валкового преса, як технічної системи, являє собою формування його алгоритмічної моделі – визначення основних вузлів і механізмів преса, способів їх об'єднання в єдину конструкцію і взаємодії в процесі роботи.

При цьому виділяються основні вузли, що визначають його функціонування як основного агрегату в складі технологічної лінії брикетування:

- рама або станина;
- валковий блок;
- завантажувальний пристрій;
- пристрій захисту валків від перевантажень;
- підпресовник (якщо такий передбачений);
- лінія приводу (синхронізуюча передача, двигун, редуктор, муфти і т.п.);
- електрична керуюча апаратура;
- захисні елементи – кожухи тощо.

Структурний синтез преса здійснюється наступним чином. На основі конструктивної схеми складається принципова схема валкового преса із зазначенням функціональних елементів і їх зв'язків.

Компонування моделі преса здійснюється на базі елементів кластера системи, що містить опис і характеристики, що є в наявності вже розроблених конструктивних елементів преса.

Вибрані елементи моделі преса з'єднуються між собою інформаційними зв'язками, в результаті чого формується математична модель валкового преса, що розробляється. Кожній моделі преса присвоюється певне маркування.

Структурний синтез і аналіз має на увазі деталізацію структурної схеми математичної моделі створюваного преса або окремих його вузлів. Наприклад, прес оснащений пристроєм для запобігання валків від перевантажень. У такому варіанті деталізується конструктивне виконання даного пристрою. Вказується його тип – механічне або гідравлічне. При необхідності додатково деталізується структура принципового конструктивного виконання даного вузла преса. Наприклад, механічний запобіжний пристрій, що складається з двох силових елементів з тарілчастими пружинами, розташованими на деякій відстані вище лінії, що з'єднує центри валків преса і т.п. Такий опис формулюється з використанням спеціально створюваних блоків даних.

Структурний аналіз валкового преса представляється у вигляді процесу формування його структурної схеми, що відображає конструктивні, технологічні та інші особливості створюваної моделі.

Технологічні особливості застосування валкових пресів в складі ліній брикетування дрібнофракційних сировинних матеріалів вимагають вирішення завдання їх структурного опису.

Прикладом завдання структурного аналізу стосовно валкових пресів є рішення задачі вибору раціонального компонувального рішення преса на основі аналізу набору різних варіантів його кінематичних схем з урахуванням особливостей проектної побудови лінії брикетування.

Структурно-параметричний синтез стосовно розробки валкового преса можна коротко проілюструвати так. Необхідно розробити валковий прес для брикетування матеріалу з малою насипною щільністю ($\rho_{bulk} \leq 0{,}3$ г/см^3). Створення такого преса вимагає синтезу його кінематичної схеми, включаючи,

при необхідності, схему подпрессовщіка - це відноситься до структурної частини синтезу. Вказівка конкретних значень геометричних, конструктивних енергосилових і інших параметрів створюваного преса є параметричною частиною синтезу преса.

Структурно-параметричний аналіз конструкції валкового преса, передбачає виділення одного або кількох критеріїв її оптимальності. На базі цих критеріїв вирішується завдання пошуку оптимальної структури валкового преса, що розробляється, серед усіх можливих варіантів. Тобто, проводиться аналіз ефективності можливих рішень задачі структурного синтезу модифікацій створюваного преса і вибір з них того варіанта, який максимально відповідає прийнятим критеріям оптимальності.

В загальному вигляді задача структурно-параметричного синтезу оптимальної конструкції валкового преса описана виразом:

$$extrF(X), X \in D_X, \tag{6.1}$$

де

F – цільова функція;

X – вектор проектних (керованих або варійованих) параметрів, що характеризують конструкцію або режими роботи створюваного преса. Іншими словами, вектор X являє собою безліч можливих проектних рішень валкового преса в межах допустимої області:

$$D_X = \{X\} D_X = \{X \mid \varphi(X) < 0, \psi(X) = 0\}, \tag{6.2}$$

де $\varphi(X)$ и $\psi(X)$ – функції-обмеження завдання структурного синтезу конструкції валкового преса.

В якості керованих параметрів валкового преса можуть бути:

- ширина і діаметр робочих поверхонь валків преса;

- конфігурація і розміри формуючих елементів;
- геометричні параметри шнека механізму попереднього ущільнення шихти;
- межі мінімально і максимально допустимої величини ущільнення шихти, виражені через коефіцієнт ущільнення і визначають, за допомогою функціонального взаємозв'язку, щільність вироблених брикетів;
- максимально допустиме зусилля пресування, яке сприймається пристроєм запобігання валків від перевантажень;
- максимальне значення моменту пресування, яке забезпечує нормальну роботу приводу преса;
- питома зносостійкість робочих поверхонь валків, взаємопов'язана з механічними характеристиками матеріалу, що брикетується та матеріалу бандажа;
- величина пружної післядії в брикетах;
- максимально допустима частота обертання валків і т.д.

В якості цільової функції можуть бути визначені:

- необхідна продуктивність преса;
- досягнення необхідної щільності брикетів;
- робота преса з мінімально можливими значеннями енергосилових параметрів – зусилля та момент пресування;
- максимальний ресурс експлуатації робочих поверхонь валків (змінних кільцевих бандажів);
- досягнення мінімального значення металоємності при дотриманні умов надійної і безвідмовної роботи преса і т.д.

Параметричний синтез валкового преса полягає в наступному. Задаються характеристики та параметри елементів моделі преса. Параметричний синтез можна розглянути на прикладі основного конструктивного вузла преса – валок. Номенклатура вхідних параметрів валка може бути різною, тому як приклад в табл. 6.1 наведено один їз можливих варіантів.

Залежно від розв'язуваних завдань і задіяних при цьому математичних моделей кількість вхідних параметрів, що характеризують валки преса (табл. 6.1), може змінюватися.

З урахуванням того, що варіантів конструктивного виконання валків при синтезі конструкції преса може бути кілька, як, втім, і інших конструктивних елементів, то в процесі проектування кожному з таких варіантів повинне присвоюватися спеціальне маркування на манер маркування креслень даних складальних одиниць.

Рішення завдання відповідно до виразів (6.1, 6.2) передбачає створення спеціалізованого розрахунково-аналітичного програмного забезпечення і об'єднання його в єдину експертну підсистему, яка може бути частиною більш великої експертної системи, що реалізує комплексний системний підхід до розробки технологій та обладнання для брикетування.

Такий підхід обумовлений тим, що прийнятних рішень відповідно до вираження (6.1) може бути кілька і тоді експерт-проектувальник повинен буде, покладаючись на свій особистий досвід і накопичену на даний момент базу знань в області створення і експлуатації валкових пресів, вибрати лише одне конструктивне рішення створюваного преса.

Рішення таких завдань може здійснюватися з використанням широко використовуваних в різних галузях методів аналізу ієрархій, гілок і меж [197,198].

Параметричний синтез і аналіз валкового преса припускає дослідження структурної схеми преса з визначенням раціональних параметрів конструктивних елементів відповідно до заданих вихідних даних і прийнятих граничних значень характеристик преса, режимів його роботи і процесу брикетування.

Після проведення обчислень відповідно до сукупності математичних моделей і методів, що описують валковий прес і режими його експлуатації, утворюється масив розрахункових даних.

Ці дані аналізуються відповідно до прийнятих обмежень. Якщо будь-які з отриманих числових значень аналізованих параметрів, що характеризують валковий прес, не відповідають прийнятим або встановленим параметрам, то проводиться внесення змін до конструктивних елементів преса.

Таблиця 6.1 – Варіант завдання вхідних параметрів конструкції валка брикетного преса

№	Опис параметра	Значення
1.	Тип валка: 1 – суцільний; 2 – з кільцевими сегментами; 3 – з кільцевими бандажами	3
2.	Кількість пар пресуючих поверхонь: 1 – одна; 2 – дві	1
3.	Максимальне зусилля пресування, кН	2000
4.	Максимальний момент пресування, кН×м	85
5.	Діаметр валка середній, мм	648
6.	Діаметр валка максимальний, мм	705
7.	Діаметр валка мінімальний, мм	635
8.	Спосіб кріплення змінних пресуючих елементів для валків з кільцевими бандажами: 1 – шпонка призматична; 2 – шпонки сегментні; 3 – клинові кільця; 4 – клинові півкільця; 5 – самоцентрувальні швидкоз'ємні затискні елементи; 6 – не самоцентрувальні швидкоз'ємні затискні елементи	4
9.	Типорозмір формуючого елемента згідно з прийнятого кодування	R17
10.	Матеріал бандажів	Сталь 40Х
11.	Твердість пресуючих поверхонь бандажів HRC	54…62

Наприклад, потрібно забезпечити максимально можливу продуктивність преса *Q* (цільова функція). Керованими параметрами можуть бути:

- частота обертання валків *n*, обумовлена конкретними значеннями кінематичних характеристик елементів приводу (електродвигуна, редуктора, клиноремінної передачі і т.д.);

- діаметр D та ширина L пресуючих поверхонь;
- конфігурація і об'єм формуючих елементів;

В даному варіанті в якості обмежень можуть виступати:

- максимально допустима частота обертання валків n_{max}, при якій неможливо отримання брикетів з необхідною щільністю і міцністю у зв'язку з погіршенням умов захоплення матеріалу валками;
- максимальний і мінімальний об’єм v_{br} формуючого елемента і його тип (відкритий або закритий), що не дозволяють забезпечити задану продуктивність преса і щільність брикетів;
- максимально допустима потужність приводу преса N_{max}, залежить від параметрів ущільнення шихти.

При вже певній структурі преса рішення зазначеного завдання здійснюється шляхом складання декількох варіантів конструкції преса з конкретними значеннями керованих параметрів. Складені варіанти конструкцій преса аналізуються на предмет максимального наближення до оптимального значення цільової функції у відповідності зі значенням керованого параметра і прийнятих обмежень.

Параметричний аналіз валкового преса може виконуватися і для одного варіанта конструкції і для декількох – багатоваріантний аналіз.

Прикладом параметричного аналізу може бути аналіз відповідності енергосилових характеристик процесу брикетування – максимально допустимих зусилля P та моменту пресування M та необхідної потужності приводу N реальним технічним характеристикам преса. При цьому необхідно дотримуватися умов отримання брикетів з заданими характеристиками ущільнення (коефіцієнт ущільнення шихти Ky, щільність брикетів ρ_{br}) та продуктивності технологічної лінії брикетування Q.

У цьому завданню виділяються підтримувані і змінювані параметри.

Відповідно до поставленим завданням підтримуваними параметрами є:

- щільність брикетів ρ_{br};
- продуктивність преса Q;

- зусилля пресування P;
- момент пресування M;
- потужність N.

Вихідними параметрами, які можуть коригуватися, є:

- кут пресування α_{pr};
- насипна щільність шихти ρ_{bulk};
- опір шихти стисканню $p=aKy^b$;
- коефіцієнти тертя f_1, f_2 та бокового тиску ξ.

При цьому насипна щільність, опір шихти стиску, коефіцієнти тертя і бічного тиску, в свою чергу, залежать від ряду фізико-механічних характеристик: розміру і фізико-механічних властивостей частинок, що складають шихту, типу і кількості сполучного, які відносяться до ієрархії більш простого порядку .

Параметричний аналіз преса виступає в якості доповнення до рішення задачі параметричного синтезу.

В процесі параметричного аналізу виконується розрахунок значень підтримуваних параметрів для різних варіантів змінюваних параметрів. Результати розрахунку можуть бути виведені в табличному і графічному вигляді.

Ієрархічне представлення конструкції валкового преса.

Для ієрархічного уявлення конструктивних елементів валкового преса – деталей і вузлів в даній роботі запропоновано використовувати основні елементи теорії системного проектування [199].

При конструюванні валковий прес запропоновано розділяти на частини відповідно до їх функціонального призначення, які пов'язані між собою в єдину цілісну структуру – декомпозиції або ділення та агрегації, або об'єднання. Тобто, конструкція преса представляється у вигляді ієрархічної структури, в якій кожна вершина є об'єднанням більш нижчих рівнів (рис. 6.2). Обмеженням рівня декомпозиції валкового преса і його вузлів є деталь.

При цьому слід зазначити, що для ряду задач структурно-параметричного синтезу валкового преса декомпозиція вузлів до деталей не є необхідною. Крім того, у різних вузлів і систем валкового преса можуть бути різні рівні декомпозиції.

Найбільш наочним і ефективним способом для вирішення завдання декомпозиції валкових пресів представляються графи і дерева типу «І-АБО-дерева» [199].

Декомпозиція валкового преса дозволяє представити його у вигляді модулів, які, в свою чергу, діляться на рівні, які утворюють ієрархічну модель. Під модулями в даному варіанті декомпозиції обладнання запропоновано розуміти конструктивні елементи, за допомогою яких можливий синтез різних варіантів конструкції валкового преса.

На рис. 6.2 представлена узагальнена схема декомпозиції валкового преса. Відповідно до представленої схеми декомпозиції преса з базових модулів складений приклад таблиці даних модулів, які можуть застосовуватися в різних модифікаціях валкових пресів конструкції ІЧМ.

Таким чином, представивши конструкцію валкового преса у вигляді ієрархічної багаторівневої системи, з'являється можливість вирішення наступних завдань:

1. Структурувати набір можливих конструктивно-функціональних модулів (вузлів і деталей) преса.
2. Накопичити базу даних різних типорозмірів конструктивних елементів преса.
3. Застосувати до вирішення завдання синтезу раціональної конструкції преса методи багатофакторного аналізу - теорію графів і метод аналізу ієрархій.

Рішення завдання застосування методів багатофакторного аналізу до розробки раціональної конструкції валкового преса має вирішуватися постадійно. У даній роботі вирішена задача застосування методу аналізу ієрархій до вибору раціональної конфігурації пресуючих поверхонь валків. Етапи розробки і приклади застосування цього методу до вибору формуючих елементів валкового преса представлені в наступному підрозділі.

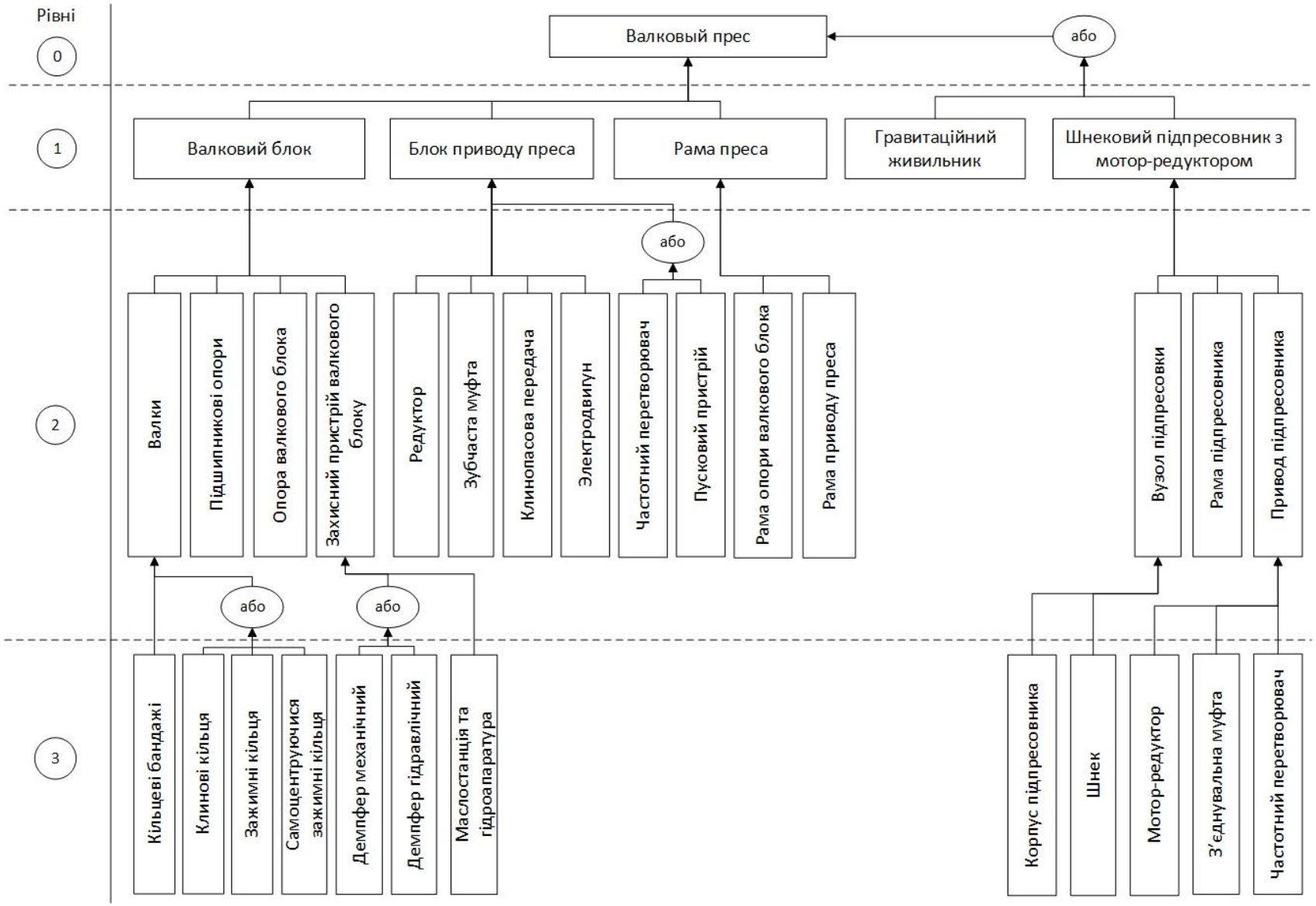


Рисунок 6.2 – Узагальнена декомпозиція валкового преса конструкції ІЧМ з базових модулів

Таблиця 6.2 – Основні базові елементи валкових пресів конструкції ІЧМ, використовувані при створенні пресів за модульним принципом

1. Валковий блок					
1.1. Валки					
1.1.1 Кільцеві бандажі					
Позначення	Ширина, мм	Діаметр середній, мм	Типорозмір формуючого елемента	Спосіб кріплення на ступицю валка	Модифікації пресів
R6KK648/360	360	648	R6 (25,0Ч21,0Ч12,0мм)	Клинове кільце	16, 19, 19М, 25М, 25Л, 22М
R14KK648/360	360	648	R14 (32,0Ч30,0Ч15,0мм)	Клинове кільце	16, 19, 19М, 25М, 25Л, 22М
R17KK648/360	360	648	R17 (40,0Ч38,5Ч18,5мм)	Клинове кільце	16, 19, 19М, 25М, 25Л, 22М
R30KK648/360	360	648	R30 (63,6Ч60,0Ч30,0мм)	Клинове кільце	16, 19, 19М, 25М, 25Л, 22М
R6KN648/360	360	648	R6 (25,0Ч21,0Ч12,0мм)	Затискні кільця	16, 19, 19М, 25М, 25Л, 22М
R14KN648/360	360	648	R14 (32,0Ч30,0Ч15,0мм)	Затискні кільця	16, 19, 19М, 25М, 25Л, 22М
R17KN648/360	360	648	R17 (40,0Ч38,5Ч18,5мм)	Затискні кільця	16, 19, 19М, 25М, 25Л, 22М
R30KN648/360	360	648	R30 (63,6Ч60,0Ч30,0мм)	Затискні кільця	16, 19, 19М, 25М, 25Л, 22М
R6KS648/360	360	648	R6 (25,0Ч21,0Ч12,0мм)	Затискні самоцентру-вальні кільця	16, 19, 19М, 25М, 25Л, 22М
R14KS648/360	360	648	R14 (32,0Ч30,0Ч15,0мм)	Затискні самоцентру-вальні кільця	16, 19, 19М, 25М, 25Л, 22М
R17KS648/360	360	648	R17 (40,0Ч38,5Ч18,5мм)	Затискні самоцентру-вальні кільця	16, 19, 19М, 25М, 25Л, 22М
R30KS648/360	360	648	R30 (63,6Ч60,0Ч30,0мм)	Затискні самоцентру-вальні кільця	16, 19, 19М, 25М, 25Л, 22М
R6KK648/202	202	648	R6 (25,0Ч21,0Ч12,0мм)	Клинове кільце	24М, 24МП, 24Б
R14KK648/202	202	648	R14 (32,0Ч30,0Ч15,0мм)	Клинове кільце	24М, 24МП, 24Б
R17KK648/202	202	648	R17 (40,0Ч38,5Ч18,5мм)	Клинове кільце	24М, 24МП, 24Б
R30KK648/360	202	648	R30 (63,6Ч60,0Ч30,0мм)	Клинове кільце	24М, 24МП, 24Б
R6KN648/202	202	648	R6 (25,0Ч21,0Ч12,0мм)	Затискні кільця	24М, 24МП, 24Б
R14KN648/202	202	648	R14 (32,0Ч30,0Ч15,0мм)	Затискні кільця	24М, 24МП, 24Б
R17KN648/202	202	648	R17 (40,0Ч38,5Ч18,5мм)	Затискні кільця	24М, 24МП, 24Б
R30KN648/202	202	648	R30 (63,6Ч60,0Ч30,0мм)	Затискні кільця	24М, 24МП, 24Б
R6KS648/202	202	648	R6 (25,0Ч21,0Ч12,0мм)	Затискні самоцентру-вальні кільця	16, 19, 19М, 25М, 22М
R14KS648/202	360	648	R14 (32,0Ч30,0Ч15,0мм)	Затискні самоцентру-вальні кільця	16, 19, 19М, 25М, 22М

R17KS648/202	360	648	R17 (40,0Ч38,5Ч18,5мм)	Затискні самоцентру-вальні кільця	16, 19, 19М, 25М, 22М
R30KS648/202	360	648	R30 (63,6Ч60,0Ч30,0мм)	Затискні самоцентру-вальні кільця	16, 19, 19М, 25М, 22М

1.1.2. Кріплення бандажів на валок

Позначення	Крутний момент, що передається, кН×м	Габаритні розміри D×d×H, мм	Модифікації пресів
Клинове кільце 16.1.9	≈100	520Ч410Ч85	16, 19, 19М, 24М, 24Б, 24МП 25М, 25Л, 22М
KLGG 400/495	до 459		24М, 24Б, 24МП 25М, 25Л, 22М

1.2. Підшипникові опори

Позначення	Підшипник					Зусилля, що сприймається валком, кН	Модифікації пресів
	номер	d, мм	D, мм	L, мм	P, кН		
22М.1.1, 22М.2.1	3003744	220	370	120	1380	2000 (до 2760)	22М
25М.1.1, 25М.2.1	3538Н	190	340	92	800	1500 (до 1600)	25М, 25Л
24М.1.1, 24М.2.1	3532Н	160	290	80	600	1000 (до 1200)	19, 19М, 24М, 24Б

1.3. Опори валкового блока

Позначення	Модифікації пресів
19М.3.1	19М, 25М
24М.3.1	24М, 24Б
25Т.3.1	25Л
22М.3.2	22М

1.4. Захисний пристрій валкового блоку

1.4.1 Демпфера пристрої захисту валків від перевантажень

Позначення	Тип	Зусилля на одному демпфері / загальне, кН	Модифікації пресів
24.М.4	механічний	260/1040(≈1000)	24М, 24Б, 19М
22.М.9	механічний	630/2520(≈2500)	22М
25.М.4.П	механічний	≈400/1600	25М
22М.4	гідравлічний	500…650/2000…2550	22М
25М.4	гідравлічний	400/1600	25М

1.4.2. Маслостанції и гідроапаратура

Позначення	Робочий тиск в демпферах, МПа	Тип приводу насоса	Модифікації пресів
22.4.00.001	26	електричний	16, 19, 19М, 24М, 24Б, 24МП, 25М, 25Л, 22М
22.10	26	ручний	16, 19, 19М, 24М, 24Б, 24МП, 25М, 25Л, 22М

2. Блок приводу преса

2.1. Редуктор

Позначення	Номінальний крутний момент, кН×м	D1, мм	D2, мм	Маса, т	Модифікації пресів
Ц2Н-450-50-12	35	80	160	1,5	19М, 24М, 24Б
Ц3Н-450-200-12	35; 40	50	160	1,7	19М, 24М, 24Б
Ц2Н-500-50-12	40; 56	90	180	2,1	24М, 25М, 25Л
Ц3Н-500-160-12	56	55	180	2,1	25М, 25Л
ЦДН-630-50-12	71	80	220	3,7	22М, 25М, 25Л
Ц3Н-630-160-12	85(90)	80	220	3,9	22М, 25М, 25Л

2.2. Зубчаста муфта

Позначення	Номінальний крутний момент, кН×м	d, мм	D, мм	Маса, кг	Модифікації пресів
МЗ-10	50	110	260	264	19М, 24М, 24Б

М3-11	71	120	300	376	25М
М3-12	100	140	340	531	22М

2.3. Клиноремінна передача

Тип ременів	Передавальне відношення передачі, яке визначається співвідношенням діаметрів шківів	Модифікації пресів
SPC-2240Ш	1,0; 1,5; 2,0	19М, 23, 24М
SPC-2800Ш	1,0; 1,67; 2,26	25М, 22М
SPC-2900Ш	2,12	25Л

2.4. Електродвигун

Модель (старе маркування/ нове маркування)	Тип	Напруга мережі, В	Потужність, кВт	Частота обертів, $мин^{-1}$	Модифікації пресів
4А200М8У3 / АИР 200 М8	асинхронний	220/380	18,5	750	23
4А225М8У3 / АИР225М8	асинхронний	220/380	30	750	24М, 19, 19М
4А225М4У3 / АИР225М4	асинхронний	220/380	55	1500	19М, 24М, 24Б
4А250S4У3 / АИР250S4	асинхронний	220/380	75	1500	25М, 25Л, 22М

2.5. Частотний перетворювач

Виробник, серія	Модель	Напруга мережі, В	Потужність, кВт	Модифікації пресів
Delta Electronics VFD-CP2000	VFD185CP4EB-21	380	18,5	23
	VFD220CP43A-21	380	22,0	23
	VFD300CP4EB-21	380	30,0	19, 19М, 24М
	VFD370CP43B-21	380	37,0	19, 19М, 24М
	VFD550CP43S-21	380	55,0	19М, 24М, 24Б
	VFD750CP43B-21	380	75,0	19М, 24М, 24Б, 25М, 25Л, 22М
	VFD900CP43A-21	380	90,0	25М, 25Л, 22М

3. Рама

Позначення	Модифікації пресів
24М.3	24М
24М.3-01	24М
24М.3-02	24М

6.2. Розробка комплексного методу визначення раціональної конфігурації пресуючих поверхонь валків

Аналіз літературних джерел [1,15-20,64-68,76,77,82,87,133,135,136,142] показує, що в даний час відсутні чітко сформульований системний підхід і критерії вибору раціональної конфігурації пресуючих поверхонь і конструкції валків брикетних пресів. Створення комплексного методу для встановлення раціональних геометричних параметрів валків дозволить при розробці і проектуванні пресів враховувати сукупний ефект наступних факторів:

- фізичні характеристики матеріалу, що брикетується (насипна щільність, фракція, вологість) [84,85,88,93,94,96,104];

- вимоги до брикетів (форма, розмір, щільність, міцність), параметри брикетування (зусилля і момент пресування) , вплив пружної післядії в брикетах [88,94,96, 104,106,175,176,200];
- величину зносу робочих поверхонь валків і т. п [123,127,162,163,172,184,201,202].

Раціональні геометричні співвідношення та розміри бандажів і формуючих елементів, які забезпечують отримання брикетів з заданими характеристиками, повинні забезпечувати:

- отримання брикетів з заданими формою, розмірами і якістю;
- мінімальну нерівномірність розподілу ущільнення по перетину брикету з урахуванням умов пресування шихти в осередку деформації валкового преса і пружної післядії;
- мінімальні значення енергосилових параметрів;
- задану продуктивність;
- максимальний ресурс експлуатації валків.

Раніше автором дисертації виконана робота, в якій сформульовані критерії вибору раціональної конфігурації пресуючих поверхонь валкових пресів [203]. З огляду на результати роботи [203], різноманітність матеріалів, що брикетуються, практичний і теоретичний досвід, накопичений фахівцями Інституту, сформульована задача даного підрозділу роботи - створення методу, що реалізує системний підхід до визначення раціональних конструктивних параметрів робочих поверхонь бандажів валкових пресів.

На рис. 6.3 представлена структура методу визначення раціональних геометричних параметрів бандажів валкових пресів, яка включає вихідні дані, методи розрахунку параметрів брикетування і характеристик експлуатації обладнання, обмеження, вихідні дані у вигляді розрахункових значень параметрів, що характеризують проектовані валки преса, і критерії оцінки раціональності конструкції бандажів [204,205].

Застосування створених раніше в Інституті чорної металургії розрахунково-аналітичних методів [1,77,78,87,133-136,150,162,163,173,174,176] відповідно до запропонованої структурної схеми дозволяє сформувати масиви розрахункових даних енергосилових і технологічних параметрів брикетування, експлуатаційних характеристик пресового обладнання для різних варіантів конструкції бандажів валкових пресів.

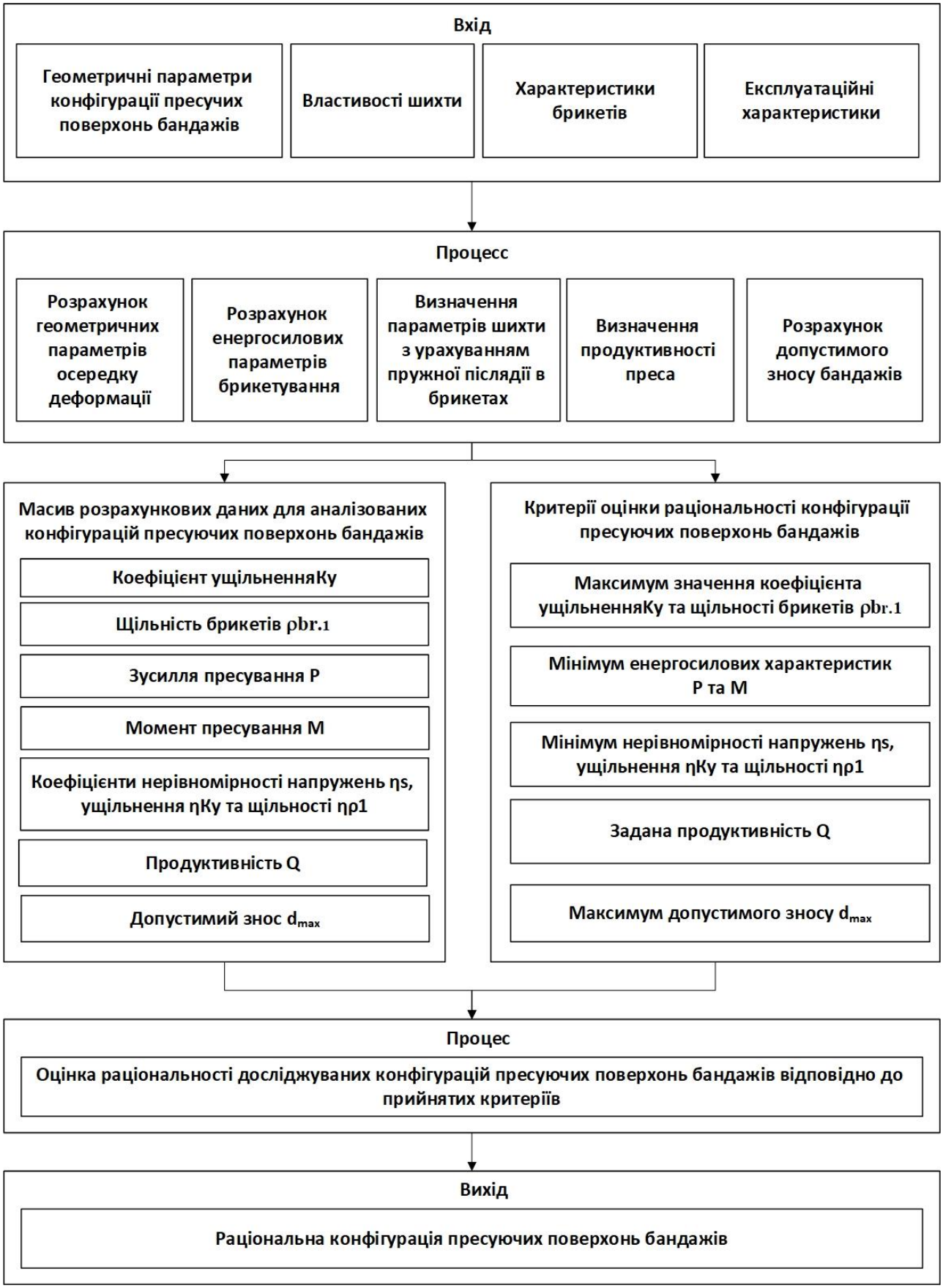


Рисунок 6.3 – Структура методу вибору раціональних геометричних параметрів бандажів валкових пресів

Відповідно до схеми, представленої на рис. 6.3, вихідними даними служать фізико-механічні властивості шихти, задані характеристики брикетів, геометричні параметри валків та формуючих елементів і т.д.

Основними фізико-механічними характеристиками шихти, що брикетується необхідними для опису процесів, що відбуваються в осередку деформації валкового преса, є:

- коефіцієнти зовнішнього f_1 та внутрішнього f_2 тертя та бічного тиску ξ;
- опір шихти стисканню $p = f(Ky)$, де p – тиск пресування; Ky – коефіцієнт ущільнення;
- залежність величини і розподілу пружної післядії від тиску пресування $\delta_V = f(p)$;
- залежність величини і розподілу щільності $\rho_{br.1}$ в брикеті після зняття залишкових пружних деформацій від тиску пресування $\rho_{br.1} = f(p)$.

Визначення параметрів осередку деформації (кутів захоплення матеріалу валками, пресування і т.д.), напружено-деформованого стану шихти, енергосилових характеристик брикетування і продуктивності преса здійснюється за методиками, описаними в роботах [1,77,78,87].

Розрахунок максимально допустимої величини зносу бандажів визначається згідно з раніше розробленим методом [162,163].

В результаті розрахунково-аналітичних методів у відповідності зі схемою, представленою на рис. 6.3, і методів, створених в дисертації і наведених в роботах [162,163], для кожного варіанта конструктивного виконання валків формується масив розрахункових даних енергосилових і технологічних параметрів брикетування і роботи преса:

- діапазон регулювання кута пресування α_{pr};
- діапазон коефіцієнту ущільнення Ky, що досягається;
- діапазон щільності брикетів, що досягається, з урахуванням пружної післядії $\rho_{br.1}$;
- зусилля пресування P;
- момент пресування M;

- коефіцієнти рівномірності розподілу напружень η_σ, коефіцієнта ущільнення η_{Ky}, щільності $\eta_{\rho 1}$ [176,203-205];
- максимально допустимий знос бандажів δ_{max};
- продуктивність Q и т.д.

Отриманий масив даних аналізується відповідно до зазначених в правій частині критеріями, докладно описаними в роботах [203-205]. Результатом порівняльного аналізу масиву розрахункових даних технологічних, енергосилових і експлуатаційних характеристик для проектованих бандажів є вибір, на думку експерта, найбільш раціональної конфігурації пресуючих поверхонь валків.

Велика кількість аналізованих параметрів, значна кількість варіантів матеріалів, брикетуються та 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. Одним з них є метод аналізу ієрархій (MAI) [198,206-208]. Для застосування (MAI) до розв'язуваної в роботі задачі він повинен бути трансформований у відповідності з наступною схемою:

1. Структурування проблеми вибору раціональних геометричних параметрів валків брикетних пресів у вигляді ієрархії або мережі.
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.
3. Обчислення коефіцієнтів важливості для елементів кожного рівня ієрархії вибору раціональної геометрії валків, формуючих елементів і, при необхідності, перевірка узгодженості оцінок.
4. Обчислення комбінованого вагового коефіцієнта і визначення найкращого конструктивного виконання бандажів з усіх розглянутих варіантів.

На рис. 6.4 представлена схема трирівневої ієрархії вибору раціональної конструкції робочих поверхонь бандажів валкових пресів.

На першому рівні ієрархії розташовується кінцева мета, в нашому варіанті – це найбільш ефективне конструктивне виконання бандажів. У даній роботі запропоновані п'ять основних критеріїв (рис. 6.4), деякі з яких можуть включати кілька підкритеріїв, які можуть визначати локальні пріоритети вибору ефективної конструкції бандажів.

На основі прийнятих критеріїв та масиву розрахункових даних сформований другий рівень ієрархії (рис. 6.4), який включає в себе параметри k_i (параметр 1, параметр 2, …, параметр i, … параметр n), значення яких визначають пріоритетність вибору того чи іншого конструктивного виконання бандажів валкового преса.

Третій рівень ієрархії – це альтернативи, якими в даній роботі є аналізовані варіанти конструкції бандажів – K_1, K_2, …, K_i.

Залежно від властивостей матеріалів, що брикетуються, вимог технології отримання брикетів і експлуатації пресового обладнання кількість аналізованих конструкцій бандажів, параметрів, за якими ведеться їх аналіз, та критерії оцінки можуть змінюватися. Наприклад, у варіанті, коли брикетується матеріал зі значним ступенем опору стисненню і високою абразивністю, крім забезпечення заданої щільності брикетів, значною пріоритетністю буде володіти можливість забезпечення максимальної тривалості експлуатації бандажів. Матеріали з малою насипною щільністю, такі як торф, буре вугілля, лігнін мають значно виражені пружні властивості. В цьому варіанті при аналізі конфігурації пресуючих поверхонь особливу увагу треба звернути на ступінь впливу пружної післядії на якість брикетів.

У процесі аналізу, конструкції бандажів необхідно ранжувати за ступенем ефективності здійснення процесу брикетування і сприятливості умов експлуатації обладнання. З огляду на багатоваріантність реалізації процесу брикетування, в структурі ієрархії вибору раціональної конструкції бандажів можуть виникати альтернативні близькі між собою або рівнозначні варіанти. Тоді остаточне рішення про вибір найкращого варіанту здійснює експерт, базуючись на своєму особистому досвіді.

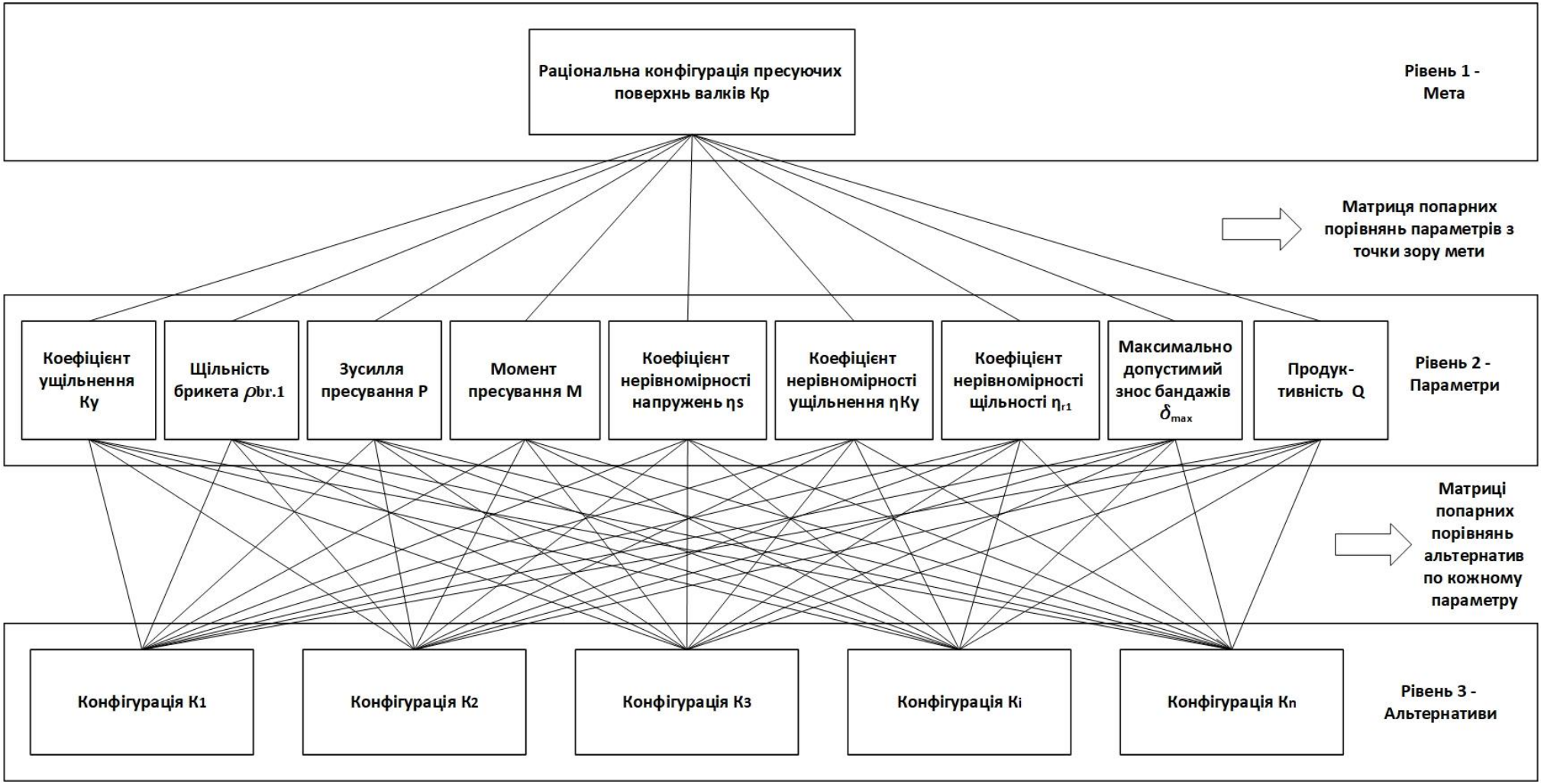


Рисунок 6.4 – Трирівнева ієрархія вибору раціональної конструкції бандажів валкового преса

Визначивши ієрархічну структуру вибору раціональної конструкції бандажів валкових пресів (рис. 6.4), стає можливим формування матриць попарних порівнянь. Параметри порівнюються попарно по відношенню до мети (найбільш ефективної конструкції бандажів K_e), альтернативи (аналізовані конструкції бандажів K_i, $i=1...m$) – попарно по відношенню до кожного з параметрів k_i. Відповідно заповнюються матриці парних порівнянь: одна - для параметрів, n матриць – для досліджуваних конфігурацій формуючих елементів відповідає кількості параметрів, за якими аналізується ефективність бандажів.

Складність в оцінці пріоритетності параметрів відносно один одного полягає в тому, що кожен параметр має свою величину вимірювання.

Відповідно до теорії методу аналізу ієрархій, для порівняння аналізованих параметрів ієрархії використовується шкала відносної важливості Сааті, що включає 9 варіантів ступеня переваги (від 1 до 9) для попарного порівняння аналізованих параметрів [198,206-208]. Залежно від пріоритетності одного параметра над іншим відповідно до даної шкалою можна сформувати оціночні відносини. Припустимо, що величина щільності брикету $\rho_{br.1}$, на думку фахівця, має, в рамках поставленого завдання по вибору раціональної калібрування, істотно більшу значимість, ніж величина зусилля пресування P. В таком варианте оценочное соотношение будет равняться, к примеру, 1:5. Таким чином, використовуючи шкалу відносної важливості, відкривається можливість зв'язати перший і другий рівень ієрархії, представленої на рис. 6.4, шляхом формування матриці попарних порівнянь параметрів k_i оцінки ефективності конструкції бандажів:

$$A_i = \begin{bmatrix} v_1/v_1 & v_1/v_2 & \dots & v_1/v_n \\ v_2/v_1 & v_2/v_2 & \dots & v_2/v_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_n/v_1 & v_n/v_1 & \dots & v_n/v_n \end{bmatrix}, \qquad (6.3)$$

де v_i – ваги або інтенсивності порівнюваних параметрів k_1, k_2, … , k_n, за якими оцінюється ефективність конструкції бандажів, тобто вага параметра k_1 щодо k_2 выражается как $a_{1.2}=v_1/v_2$, аналогічно формуються елементи матриці (6.3) для порівняння всіх параметрів:

$$a_{i.j} = v_i / v_j \,, \tag{6.4}$$

Матриця попарних порівнянь (6.3) має властивість зворотного симетрії:

$$a_{i.j} = 1 / a_{j.i} \,, \tag{6.5}$$

Методика аналізу матриці A_i (6.3) наступна. В першу чергу, визначається сума елементів кожного стовпця:

$$\varepsilon_j = a_{1.j} + a_{2.j} + ... + a_{n.j} = \sum_{i=1}^{n} a_{i.j} \,. \tag{6.6}$$

Далі проводиться розподіл всіх елементів матриці на суму елементів відповідного стовпця:

$$A_{i.j} = A_{j.i} = a_{i.j} / \varepsilon_j \,. \tag{6.7}$$

Дії відповідно до виразів (6.5-6.7) називаються нормування матриці. Далі знаходиться середнє арифметичне (або геометричне) значення для кожного рядка матриці:

$$\overline{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{1} A_{i.j} \,. \tag{6.8}$$

Отриманий стовпець значень $\overline{X}_i$ задає «ваги» або ступінь значущості аналізованих параметрів *ki* з точки зору поставленої мети - пошуку раціональної конструкції бандажів K_e. Він також називається ваговим стовпцем критеріїв по цілі. В результаті формується проміжний висновок значущості в частках і / або у відсотках, розглянутих параметрів оцінки раціональності конфігурації пресуючих поверхонь бандажів.

Слід зазначити, що кількість аналізованих параметрів і їх ступінь переваги може змінюватися в залежності від вимог, що пред'являються до бандажів. Так, в одному варіанті найкращим може бути забезпечення максимального періоду їх експлуатації, що характеризується величиною максимально допустимого зносу δ_{max}. В іншому варіанті пріоритетним буде забезпечення максимальної продуктивності Q. Можливий також варіант, коли пріоритети двох або більше параметрів будуть прийняті рівнозначними.

Другий і третій рівень ієрархії (рис. 6.4) пов'язують між собою матриці попарних порівнянь варіантів (альтернатив), якими в даній роботі є аналізовані конструкції бандажів K_i, за параметрами k_i. Кількість даних матриць дорівнює кількості параметрів, за якими оцінюється ефективність конструктивного виконання бандажів.

Аналізовані в роботі параметри k_i мають певну числову міру, так, зусилля P вимірюється в кН, момент M – в кН×м, продуктивність Q – в т/ч, і так далі. Тому, для порівняльного аналізу конструкцій бандажів окремо по кожному параметру в якості результату оцінки зручно взяти відносини абсолютних значень відповідних характеристик (заданих, або розрахованих). У цьому варіанті матриці B_i попарних порівнянь конструкцій бандажів K_i по кожному з параметрів k_i в загальному вигляді будуть виглядати наступним чином:

- якщо найкращим, відповідно до критеріїв оцінки ефективності пресують поверхні бандажів, вважається максимальне значення аналізованого параметра:

$$B_i = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_1 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix}; \quad (6.9)$$

- якщо найкращим відповідно до критеріїв оцінки ефективності калібрування вважається мінімальне значення аналізованого параметра:

$$B_i = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_2/w_1 & \dots & w_n/w_1 \\ w_1/w_2 & w_2/w_2 & \dots & w_n/w_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1/w_n & w_2/w & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix}, \quad (6.10)$$

де w_i – абсолютні значення параметрів k_i для порівнюваних конструкцій бандажів K_i і за аналогією з виразами (6.3, 6.4) елементи матриць (6.7, 6.8):

$$b_{i.j} = \frac{w_i}{w_j}. \quad (6.11)$$

Для матриць другого рівня ієрархії також здійснюються дії відповідно до виразів:

$$\chi_j = b_{1.j} + b_{2.j} + \dots + b_{n.j} = \sum_{i=1}^{n} b_{i.j}. \quad (6.12)$$

$$B_{i.j} = \frac{b_{i.j}}{\chi_i}. \quad (6.13)$$

$$\overline{Y_i} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} B_{i.j}. \quad (6.14)$$

У підсумку виходять стовпчики (вектори) вагових коефіцієнтів досліджуваних варіантів конфігурацій пресують поверхонь бандажів K_i з точки зору відповідності окремими критеріями k_i.

Визначення глобальної ефективності (ваг) конфігурацій пресують поверхонь бандажів проводиться таким чином. В результаті аналізу матриць попарних порівнянь сформовані вектор $\overline{X}_i$ ваг (пріоритетів) критеріїв і матриця $\overline{Y}_i$ ваг конструкцій бандажів (альтернатив) по кожному параметру (що складається з отриманих вагових стовпців). Помноживши отриману матрицю на стовпець за правилом рядок на стовпець (матрично), отримуємо ваги Y_i, аналізованих конструкцій бандажів K_i з точки зору досягнення мети – конструкції K_e с найкращим поєднанням показників k_i процесу брикетування і умов експлуатації пресового обладнання відповідно до раніше прийнятих в роботі критеріями:

$$Y_i = \begin{bmatrix} \overline{Y}_{1.1} & \overline{Y}_{2.1} & \dots & \overline{Y}_{n.1} \\ \overline{Y}_{1.2} & \overline{Y}_{2.2} & \dots & \overline{Y}_{n.2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{Y}_{1.n} & \overline{Y}_{2.n} & \dots & \overline{Y}_{n.n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \overline{X}_1 \\ \overline{X}_2 \\ \dots \\ \overline{X}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_m \end{bmatrix}. \qquad (6.15)$$

Найкращою конфігурацією пресуючих поверхонь бандажів K_e, в результаті, буде вважатися та K_i конфігурація, для якої значення Y_i буде максимальним.

Приклад застосування методу.

Як брікетіруемого матеріалу прийнята суміш силікомарганцю дрібної фракції (фракція -3 мм) зі сполучною. Для аналізу розглянуті три варіанти пресуючих поверхонь бандажів (табл. 6.3) з форм елементами зубчасто-жолобчастою конфігурації [1,77,87], розроблених в ІЧМ, що дозволяють виробляти брикети пельменеподібної форми.

Таблиця 6.3 – Основні характеристики пресуючих поверхонь бандажів

Умовне позначення конструкції пресуючих поверхонь бандажів	Тип	Середній діаметр, мм	Ширина, мм	Габаритні розміри формуючих елементів, мм	Об'єм брикету, $см^3$
K_1	R24	648	360	36,0х60,0х27,0	48…50
K_2	R17	648	360	40,0х38,5х18,5	19…20
K_3	R10	648	360	25,6х25,0х10,5	10…12

Оцінка прийнятих конструкцій бандажів ведеться за наступними параметрами k_i:

1. Досягнутий коефіцієнт ущільнення Ky – 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 $\delta_{max.i}$, мм – k_5.

У розв'язуваної задачі найбільшу важливість має можливість досягнення встановленої ущільнення брікетіруемой шихти. Тому параметр k_1 (Ky) матиме 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 та k_3 – зусилля P_i та момент пресування M_i, які стосуються енергосилових показниками процесу брикетування, є третіми за значимістю матимуть однаковий ступінь переваги. З огляду на, що шихта на основі силікомарганцю володіє значною насипною щільністю, на умови її ущільнення і якість брикетів швидкість деформації впливає незначно, то продуктивність Q_i матиме в даному прикладі найменшу пріоритетність, так як її можна регулювати в широкому діапазоні шляхом зміни частоти обертання валків преса.

Виходячи із зазначених передумов формується матриця попарних порівнянь параметрів k_i оцінки раціональності формуючих елементів.

Для визначення пріоритетів досліджуваних конструкцій бандажів окремо по кожному параметру необхідні значення аналізованих параметрів для розглянутих типів формуючих елементів, які були приведені в табл. 6.4.

Розрахункові дані, наведені в табл. 6.4, задовольняють обмеженням за технологічними і енергосилових показниками, і завдання, яке вирішується в прикладі, зводиться до визначення раціональної конфігурації пресуючих поверхонь з урахуванням прийнятих пріоритетів і критеріїв оцінки

Таблиця 6.4 – Параметри, що характеризують аналізовані конструкції пресуючих поверхонь бандажів

K_i, i=1…3	Параметри k_i, i=1…5				
	Ky_i	P_i, кН	M_i, кН×м	Q_i, т/ч	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

.

З урахуванням прийнятої пріоритетності по аналогії з виразами (6.9, 6.10) складена матриця попарних порівнянь параметрів k_i оцінки раціональності конфігурації бандажів. Для кожного параметра з використанням шкали Сааті задані значення попарних порівнянь відповідно до ступеня їх важливості в розв'язуваної задачі:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 5 & 7 & 3 \\ 0,20 & 1 & 1 & 1 & 0,14 \\ 0,20 & 1 & 1 & 1 & 0,14 \\ 0,14 & 0,33 & 0,33 & 1 & 0,11 \\ 0,33 & 7 & 7 & 9 & 1 \end{bmatrix}. \qquad (6.16)$$

Визначено суму ε_i елементів кожного стовпця:

$$\varepsilon_1 = \begin{bmatrix} 1,08 & 15,00 & 15,00 & 19,00 & 4,40 \end{bmatrix} \qquad (6.17)$$

Вироблено поділ всіх елементів матриці A_1 (6.16) на суму елементів відповідного стовпця матриці ε_1 (6.17):

$$A_{1.1} = \begin{bmatrix} 0,533 & 0,333 & 0,333 & 0,368 & 0,682 \\ 0,107 & 0,067 & 0,067 & 0,053 & 0,032 \\ 0,107 & 0,067 & 0,067 & 0,053 & 0,032 \\ 0,076 & 0,067 & 0,067 & 0,053 & 0,032 \\ 0,178 & 0,467 & 0,467 & 0,474 & 0,227 \end{bmatrix}. \quad (6.18)$$

Нормування матриці A_1 дозволила визначити вектор пріоритетів для прийнятих параметрів, за якими оцінюється раціональність досліджуваних варіантів конструктивного виконання бандажів:

$$\overline{X}_1 = \begin{bmatrix} 0,450 \\ 0,065 \\ 0,065 \\ 0,057 \\ 0,362 \end{bmatrix}. \quad (6.19)$$

Як видно з виразу (6.19), 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%).

Далі здійснюється визначення пріоритетів досліджуваних бандажів окремо по кожному параметру. Так як кожен з аналізованих параметрів має чітку фізичну величину, то для аналізу використовується шкала відносин абсолютних величин параметрів для кожного варіанта конструкції бандажів.

На підставі розрахункових даних складена матриця попарних порівнянь за параметром коефіцієнт ущільнення *Ку*. Критерієм вибору найбільш раціонального варіанта є досягнення максимуму ущільнення $Ку \rightarrow Ку_{max}$:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1,00 & 0,99 & 0,98 \\ 1,01 & 1,00 & 0,99 \\ 1,02 & 1,01 & 1,00 \end{bmatrix} \qquad (6.20)$$

Згідно виразами (5.9, 6.11-6.14) здійснюється нормування матриці (5.20) і визначення пріоритетів. В результаті отримуємо:

$$\chi_1 = \begin{bmatrix} 3,03 & 3,00 & 2,97 \end{bmatrix},\ B_{i.j} = \begin{bmatrix} 0,330 & 0,330 & 0,330 \\ 0,333 & 0,333 & 0,333 \\ 0,336 & 0,336 & 0,336 \end{bmatrix}, \overline{Y}_1 = \begin{bmatrix} 0,330 \\ 0,333 \\ 0,336 \end{bmatrix}. \qquad (6.21)$$

Таким чином, по параметру *Ку* найбільший пріоритет має бандажі з пресуючою поверхнею K_3 (33,6%), далі йде K_2 (33,3%) і потім K_1 (30,0%).

Зусилля пресування P_i (параметр k_2) – відноситься до енергосилових показниками брикетування, тому при оцінці по ньому пріоритет буде за бандажами, що дають мінімальне значення цього параметра при отриманні брикетів заданої щільності – критерій раціональності $P_i \to P_{min}$. Розрахунок пріоритету конструкцій бандажів ведеться за виразами (6.11-6.14):

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1,00 & 0,99 & 0,76 \\ 1,01 & 1,00 & 0,77 \\ 1,32 & 1,30 & 1,00 \end{bmatrix},\ \chi_2 = \begin{bmatrix} 3,32 & 3,30 & 2,53 \end{bmatrix},$$
$$B_{2.j} = \begin{bmatrix} 0,301 & 0,301 & 0,301 \\ 0,303 & 0,303 & 0,303 \\ 0,396 & 0,396 & 0,396 \end{bmatrix}, \overline{Y}_2 = \begin{bmatrix} 0,301 \\ 0,303 \\ 0,396 \end{bmatrix}. \qquad (6.22)$$

Пріоритети бандажів по зусиллю пресування – K_1 30,1%, K_2 30,3%, K_3 33,6%.

Момент пресування M_i (параметр k_3) також є енергосилових показником брикетування, тому при оцінці по ньому пріоритет буде за конструкцією бандажів,

що дає мінімальне значення, тобто критерій раціональності $M_i \rightarrow M_{min}$ та для обчислень використовуються вирази (6.10-6.14):

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1,00 & 0,97 & 0,77 \\ 1,03 & 1,00 & 0,79 \\ 1,30 & 1,26 & 1,00 \end{bmatrix}, \ \chi_3 = \begin{bmatrix} 3,33 & 3,24 & 2,56 \end{bmatrix},$$
$$B_{3.j} = \begin{bmatrix} 0,301 & 0,301 & 0,301 \\ 0,309 & 0,309 & 0,309 \\ 0,390 & 0,390 & 0,390 \end{bmatrix}, \ \overline{Y}_3 = \begin{bmatrix} 0,301 \\ 0,309 \\ 0,390 \end{bmatrix}. \quad (6.23)$$

Пріоритети бандажів по моменту пресування P_i – K_1 30,1%, K_2 30,9%, K_3 39,0%.

При аналізі продуктивності Q (параметр k_4) критерієм раціональності є забезпечення бандажами максимальної продуктивності преса, т.е. $Q_i \rightarrow Q_{max}$, для обчислень використовуються вирази (6.9, 6.11-6.14):

$$B_4 = \begin{bmatrix} 1,00 & 1,51 & 1,79 \\ 0,66 & 1,00 & 1,18 \\ 0,6 & 0,85 & 1,00 \end{bmatrix}, \ \chi_4 = \begin{bmatrix} 2,22 & 3,36 & 3,97 \end{bmatrix}, \quad (6.24)$$
$$B_{4.j} = \begin{bmatrix} 0,450 & 0,450 & 0,450 \\ 0,298 & 0,298 & 0,298 \\ 0,252 & 0,252 & 0,252 \end{bmatrix}, \ \overline{Y}_4 = \begin{bmatrix} 0,450 \\ 0,298 \\ 0,252 \end{bmatrix}$$

Ступінь пріоритетності бандажів по забезпечується продуктивності наступна – K_1 45,0%, K_2 29,8%, K_3 25,2%.

Згідно з прийнятим критерієм оцінки по максимально допустимому зносу δ_{max} (параметр k_5) найбільш раціональної буде конфігурація пресують поверхні, що забезпечує $\delta_{max} \rightarrow \delta_{max}max$. Відповідно до виразами (6.9, 6.11-6.14) визначені пріоритети досліджуваних конфігурацій пресуючих поверхонь бандажів за цим показником:

$$B_5 = \begin{bmatrix} 1,00 & 1,24 & 1,74 \\ 0,81 & 1,00 & 1,40 \\ 0,58 & 0,85 & 1,00 \end{bmatrix},\ \chi_5 = \begin{bmatrix} 2,38 & 2,95 & 4,14 \end{bmatrix},$$
$$B_{5.j} = \begin{bmatrix} 0,420 & 0,420 & 0,420 \\ 0,339 & 0,339 & 0,339 \\ 0,241 & 0,241 & 0,241 \end{bmatrix},\ \overline{Y}_5 = \begin{bmatrix} 0,420 \\ 0,339 \\ 0,241 \end{bmatrix}. \quad (6.25)$$

Пріоритетність конфігурацій пресуючих поверхонь по параметру максимально допустимого зносу складає K_1 42,0%, K_2 33,9%, K_3 24,1%.

Для остаточного вибору раціональної конфігурації пресують поверхні бандажів необхідно провести адитивную згортку параметрів по кожній з аналізованих конфігурацій, а потім на підставі підсумкових пріоритетів вибрати ту, якій відповідає найбільше значення. Підсумкові пріоритети обчислюються відповідно до виразу (6.15):

$$Y_i = \begin{bmatrix} 0,330 & 0,301 & 0,301 & 0,450 & 0,420 \\ 0,333 & 0,303 & 0,309 & 0,298 & 0,339 \\ 0,336 & 0,396 & 0,390 & 0,252 & 0,241 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.473 \\ 0,195 \\ 0,195 \\ 0,061 \\ 0.076 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,31 \\ 0,35 \\ 0,34 \end{bmatrix}. \quad (6.26)$$

Таким чином, встановлено, що за сукупністю параметрів найбільш раціональної є конструкція бандажів K_1, для неї підсумковий пріоритет Y_1=0,37 (37%), далі йде K_2, для якої Y_2=0,33 (33%) і на останньому місці знаходиться K_3 – Y_3=30 (30%).

Висновки

1. Сформульовано основні положення застосування структурно-параметричного синтезу і аналізу до вирішення завдання пошуку раціональних конструкцій валкових пресів. Розроблено ієрархічна структура декомпозиції валкових

пресів, заснована на класифікації їх компонувальних, а також конструктивних рішень.

2. Сформульовано алгоритм структурно-параметричного синтезу і спосіб його реалізації стосовно пошуку раціональної конструкції валкових пресів, які формуються за модульним принципом.
3. На основі методу аналізу ієрархій запропоновано комплексний метод, який реалізує комплексний системний підхід до визначення раціональної конфігурації пресуючих поверхонь бандажів валкових пресів. Даний метод заснований на структурно-впорядкованої послідовності розрахунково-аналітичних методів і дозволяє отримати масив розрахункових даних, що відбивають зв'язку геометричних параметрів формуючих елементів з енергосилових і технологічними характеристиками брикетування, показниками експлуатації бандажів, і дозволяє здійснити вибір раціональної конфігурації пресуючих поверхонь бандажів валкових пресів. Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що запропонований метод дозволяє на стадії створення валкових пресів здійснити порівняльний аналіз, оцінку раціональності конфігурації формуючих елементів з урахуванням параметрів процесу брикетування.
4. Як приклад вирішення практичного завдання показана можливість застосування створеного в роботі комплексного методу для вибору конструкції бандажів валкового преса, що забезпечує максимальну, в межах заданих значень, величину ущільнення шихти при максимальному ресурсі експлуатації бандажів з урахуванням енергосилових показників і продуктивності.

РОЗДІЛ 7
РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ І БАЗОВИХ ВУЗЛІВ ВАЛКОВИХ ПРЕСІВ, ЩО ПРОЕКТУЮТЬСЯ ЗА МОДУЛЬНИМ ПРИНЦИПОМ

7.1 Досвід створення та промислового застосування валкових пресів конструкції ІЧМ

Інститут чорної металургії впродовж багатьох років розробляє та впроваджує на виробництві пресове обладнання для брикетування. На деякі моделі пресів та линии переробки дрібнофракційних матеріалів авторські права розробників захищені патентами України [178, 209, 211]. Виготовлення пресів ведеться згідно з технічними умовами ТУ У 29.4-00190578-001 на виробництво.

Створені в різний час фахівцями Інституту валкові преси, в тому числі за участю автора, успішно використовуються в складі технологічних ліній брикетування на ряді підприємств України та за кордоном: ПАТ «Нікопольський завод феросплавів» (рис. 7.1), ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (рис. 7.2), ТОВ «Січеславський цементний завод» (раніше «Завод з виробництва металургійних брикетів ТОВ Конкрет») (рис. 7.3), ТОВ «Промбрикет» (раніше «НВП Метрудінвест») (рис. 7.4), ПАТ та ін. Виробництво даних машин здійснюється ДП «Експериментально-виробниче підприємство Інституту чорної металургії НАН України» (ЕВП ІЧМ) спільно з підприємствами-партнерами.

На деяких підприємствах проводилися роботи з модернізації вже працючих валкових пресів з метою покращення їх технічних та технологічних показників.

Окремі з вказаних розробок впроваджені за результатами виконання дисертаційної роботи, що підтверджується відповідними актами (див. додатки с.435-438).



Рисунок 7.1 – Комплекс брикетування відсівів феросплавів на ПАТ «Нікопольський завод феросплавів» (м. Нікополь)



Рисунок 7.2 – Ділянка брикетування відсівів феросплавів на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (м. Кривий Ріг)



Рисунок 7.3 – Валковий прес ІЧМ в складі технологічної лінії ТОВ «Січеславський цементний завод» (раніше «Завод з виробництва металургійних брикетів ТОВ Конкрет») м. Кам'янське (Дніпродзержинськ)



Рисунок 7.4 – Ділянка брикетування на підприємстві ТОВ «Промбрикет» (раніше «НВП Метрудінвест») м. Дніпро (Дніпропетровськ)

Досвід розробки конструкторської документації та промислового впровадження валкових пресів конструкції ІЧМ став базою для використання структурно-параметричного синтезу та аналізу для створення валкових пресів за модульним принципом.

7.2. Конструктивні елементи преса вдосконаленої конструкції

Запропонований в роботі на основі структурно-параметричного синтезу і аналізу модульний принцип створення валкових пресів покладено в основу розробки конструкцій удосконалених валкових пресів. Дані преси скомпоновані за модульним принципом з використанням ряду уніфікованих деталей і вузлів з модельного ряду валкових пресів, розроблених раніше в ІЧМ. У цих пресах до таких уніфікованих деталей і вузлів (модулів), які можуть бути застосовані в ще декількох модифікаціях пресів, відносяться:

- елементи рами преса;
- опори валків;
- змінні кільцеві бандажі валків;
- деталі для кріплення бандажів на ступиці валків;
- пристрої для захисту валків преса від перевантажень – демпфера механічного типу;
- пристрій для подачі та попереднього ущільнення шихти – підпресовник шнекового типу;
- лінія приводу преса – електродвигун, клиноремінна передача, редуктор та зубчаста муфта.

7.2.1. Рама

Як вказувалося раніше, відмінною рисою валкових пресів конструкції ІЧМ, є те, що вона являє собою машину повністю безстаніного типу, всі силові і несучі елементи, в тому числі приводу, змонтовані на єдиному опорному елементі – рамі. У наявних на сьогодні модифікаціях валкових пресів конструкції ІЧМ рама

являє собою єдину зварну конструкцію. В даний час розроблена і випробувана на модернізованих моделях пресів конструкції ІЧМ ПБВ-19М і ПБВ-24М нова побудова рами, яка представлена на рис. 7.5.

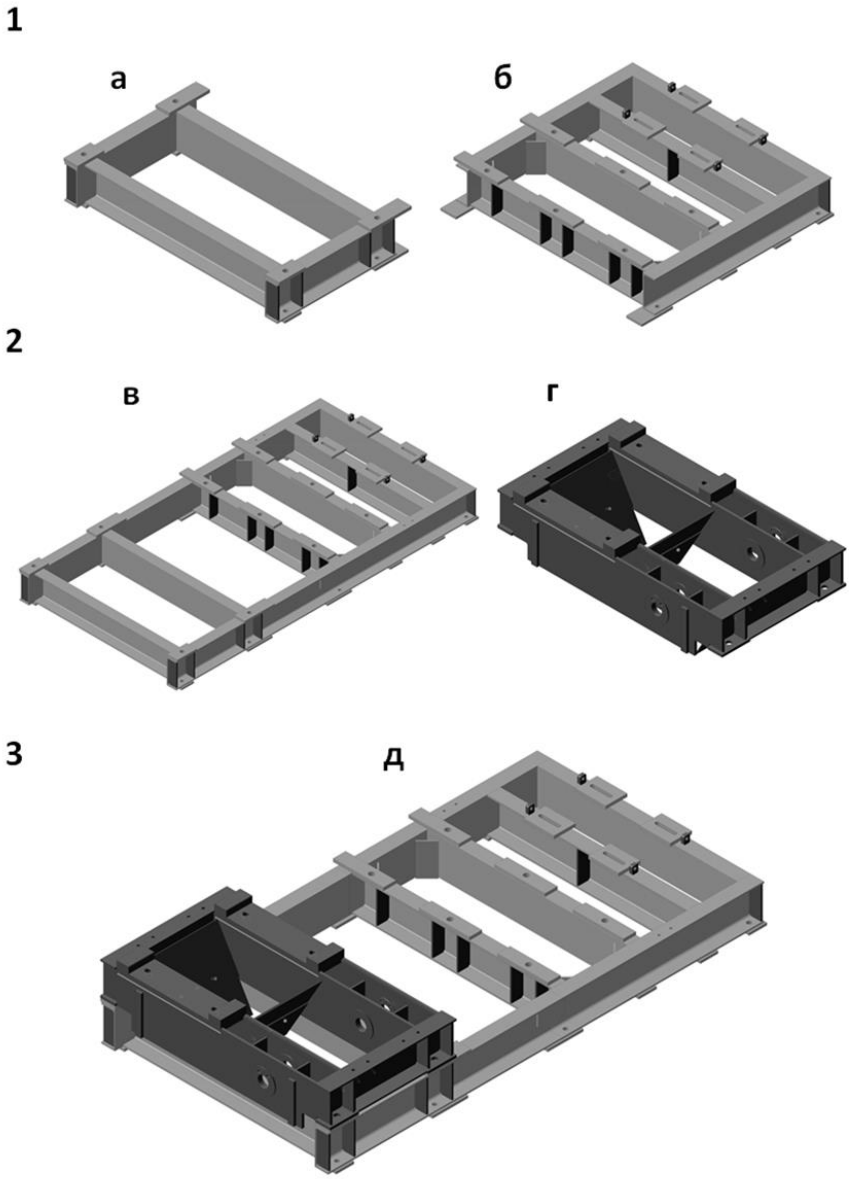


Рисунок 7.5 – Схематичне зображення концепції вдосконаленої рами преса конструкції ІЧМ

1 – виготовлення складальних елементів рами; 2 – складання елементів рами та опорного елементу валкового блоку; 3 – з’єднання рами з опорним елементом валкового блоку

а – рама елемент 1; б – рама елемент 2; в – складена рама; г – опорний елемент валкового блоку; д – рама з опорним елементом валкового блоку в з’єднаному стані

В процесі виготовлення і експлуатації така конструкція показала свою надійність в поєднанні з малою металоємністю. При цьому виявлені напрями вдосконалення конструктивного виконання, які дозволять підвищити технологічність виготовлення і спростити процеси монтажу, ремонту і експлуатації вузлів преса.

Таким чином, в процесі накопичення фахівцями Інституту досвіду виготовлення валкових пресів сформувалася нова концепція конструктивного виконання рами преса, яке, в порівнянні з ранньою конструкцією, має ряд переваг. Виконання вузла пресування у вигляді знімного валкового блоку дозволяє в процесі експлуатації преса швидко робити заміну валків зі зношеними бандажами, що підвищує ремонтопридатність пресу і скорочує простої обладнання.

Формування рами преса з декількох окремо виготовлених елементів, які при складанні з'єднуються проміжними сполучними елементами, збільшує жорсткість конструкції та створює умови для уніфікації модельного ряду валкових пресів. Так, на базі сформованих валкових блоків і вузлів приводу преса стає можливим комплектація пресів із заданими характеристиками та технологічними можливостями з використанням уніфікованих деталей і вузлів. Крім того, при роздільній механічній обробці елементів рами знижується її вартість, так як вдається задіяти менш енергоємний і габаритний верстатний парк. Неточності виготовлення при стикуванні рами валкового блоку з рамою приводу преса компенсуються за рахунок використання з'єднань, що допускають перекоси без зниження якості і надійності роботи лінії приводу.

7.2.2. Валки преса

Раніше в роботі були розглянуті та проаналізовані різні типи і варіанти конструктивного виконання валків брикетних пресів, тому в даному розділі

мова піде, саме, про валки пресів конструкції ІЧМ. На рис. 7.6 представлене принципове конструктивне рішення валка базової моделі преса ІЧМ.

На валу 1 за допомогою шпоночного з'єднання і кільцевих фланців закріплена ступиця 2, зовнішня циліндрична поверхня якої забезпечує посадку бандажа 3. Один з кільцевих фланців, закріплених на ступиці 2, забезпечує упор бандажу 3 при монтажі, а циліндрична вибірка з протилежного боку призначена для встановки клинового кільця 6. При монтажі бандаж по змінній посадці насувається на ступицю 2 до упору торцевої поверхні бандажу під фланець закріплений на ступиці. Потім між циліндричною поверхнею кільцевої вибірки ступиці та конічною кільцевою внутрішньою поверхнею бандажа встановлюється клинове кільце, виконується затягування з'єднання гайками на шпильках рівномірно по колу в діаметрально протилежних точках.

За рахунок сил тертя, що виникають між конічними поверхнями бандажу і клинового кільця при затягуванні, забезпечується міцне з'єднання бандажу зі ступицею та передача необхідного навантаження (крутного моменту) без застосування пресових посадок або, наприклад, шпоночних з'єднань. При цьому клинове кільце (рис. 7.6) для поліпшення умов затягування має щілинний розріз.

На рис. 7.7 показана схема кріплення і зняття бандажа. При заміні бандажа зняття клинового кільця забезпечується віджимними бовтами, встановленими у відповідні отвори, що рівномірно розташовані по осьовій окружності клинового кільця. Відкрутивши гайки зі шпильок вкручують віджимні бовти, які, впираючись в тіло ступиці, послаблюють контакт між напруженими конічними поверхнями і поступово відсувають клинове кільце до його повного зняття зі шпильок. Після цього бандаж знімається зі ступиці.

Як показує досвід експлуатації валкових пресів конструкції ІЧМ, кріплення змінних бандажів за допомогою клинових кілець має ряд переваг і недоліків.

До переваг слід віднести простоту конструкції та зручність монтажу.

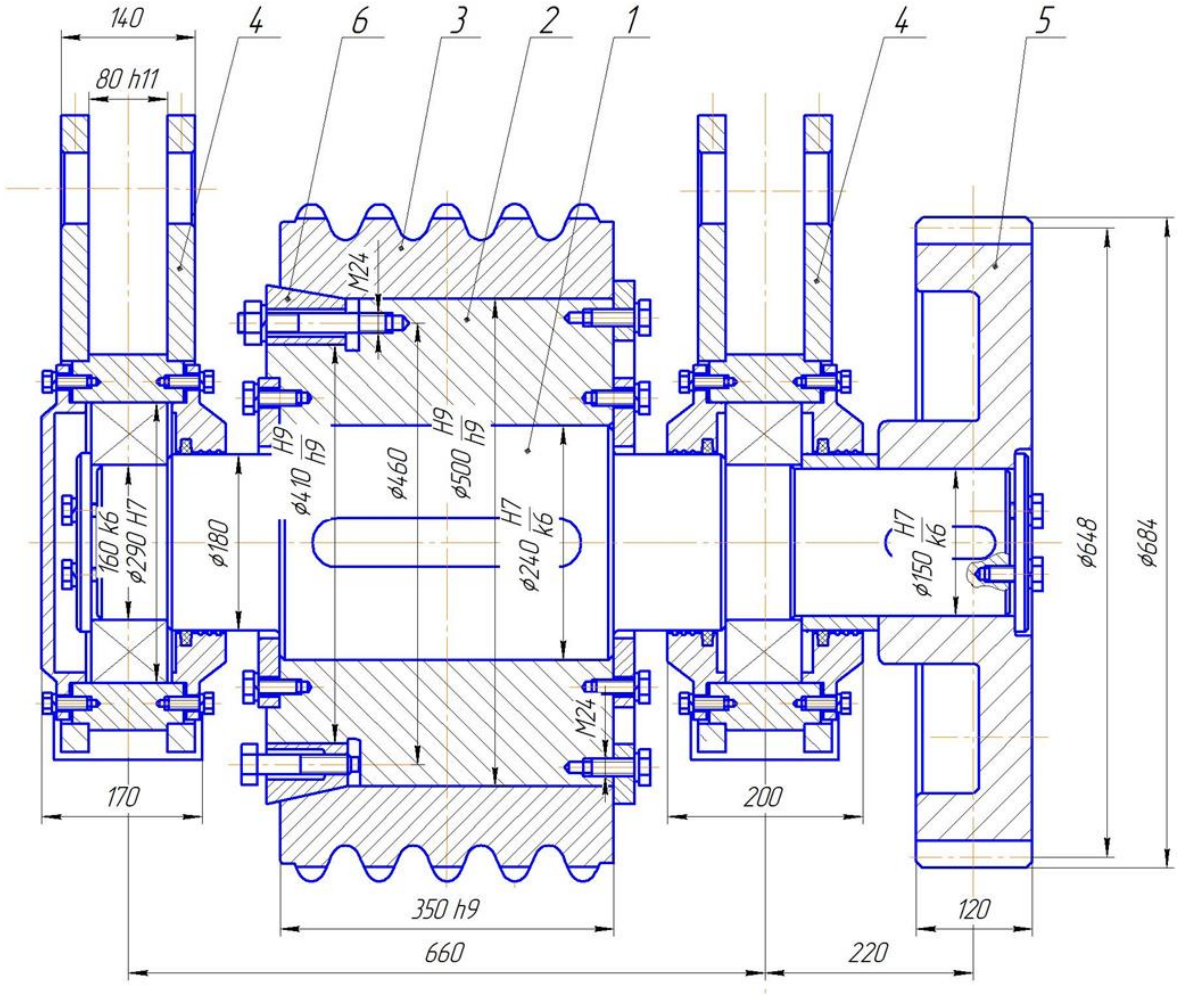


Рисунок 7.6 – Конструкція валка базової моделі преса

1 – вал; 2 – ступиця; 3 – змінний профільований бандаж; 4 – підшипникові опори; 5 – зубчасте колесо синхронізуючої передачі; 6 – клиновий затискний елемент

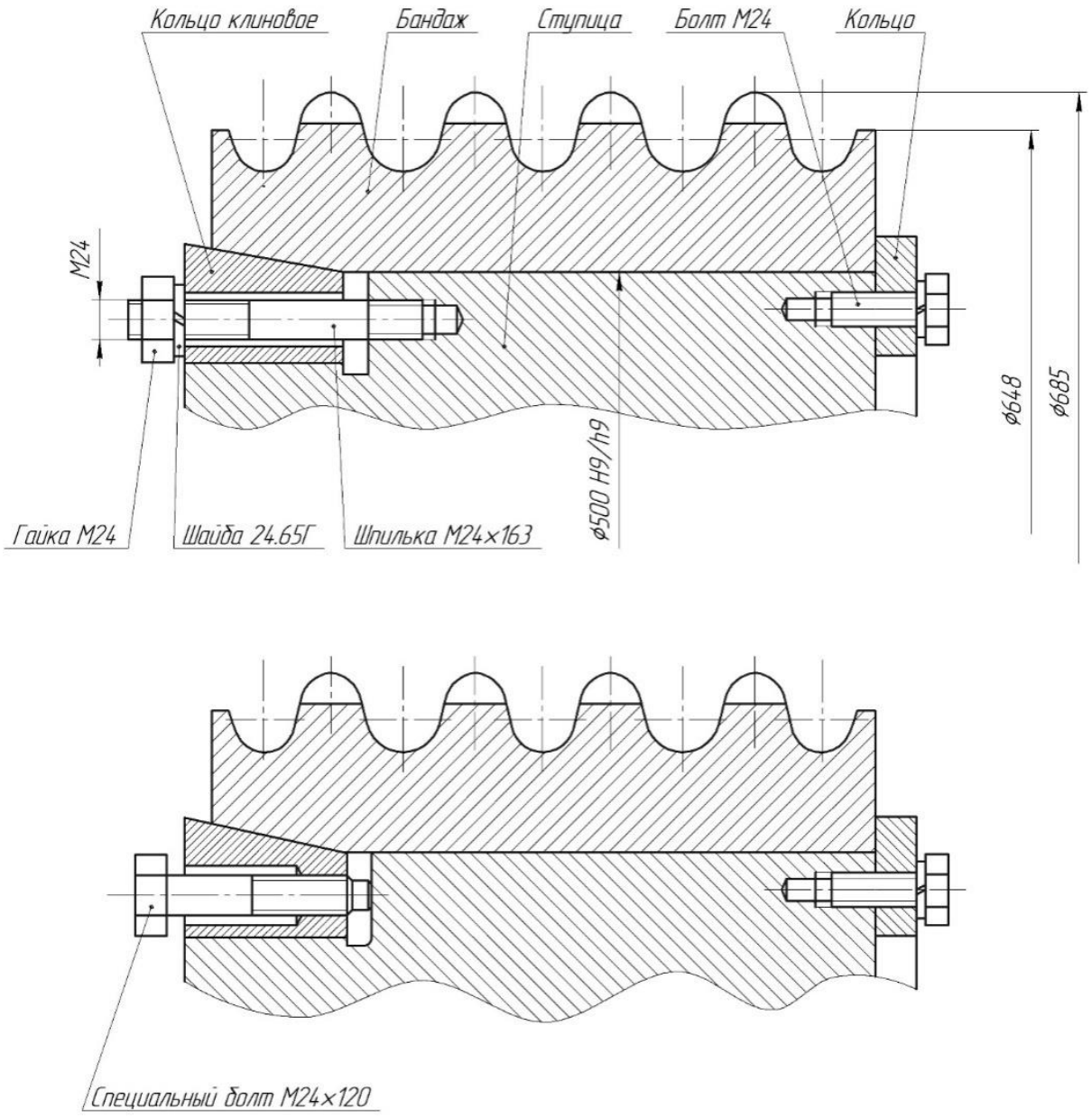


Рисунок 7.7 – Схема кріплення і зняття бандажа

До недоліків:

- високий ступінь чутливості з'єднання бандаж-клинове кільце-ступиця до точності виготовлення поверхонь деталей, що з'єднуються;

- після тривалої експлуатації валків, особливо, коли проводилася наплавка бандажів без зняття з валків, ускладнено розбирання даного з'єднання;

- ускладнення точного контролю зусилля затягування клинового кільця.

Зазначені недоліки можуть знижувати надійність кріплення бандажа на валок і приводити до зниження ресурсу експлуатації деталей валків преса. Тому

в конструкції валків вдосконаленого преса для кріплення бандажів, ступиці, синхронізуючих зубчастих коліс та напівмуфт запропоновано використання швидкоз'ємних затискних втулок (рис. 7.8)

У конструкції валків вдосконаленого преса (рис. 7.9) два бандажа 1 з використанням швидкоз'ємних кріпильних елементів 4 монтуються на ступиці 2 та жорстко закріплені на валу 3 за допомогою аналогічних швидкоз'ємних затискних втулок.

При створенні преса підвищеної продуктивності поділ пресуючих поверхонь на дві частини з використанням двох бандажів, замість простого збільшення ширини пресуючих поверхонь валка з одним кільцевим бандажем, обґрунтовано такими міркуваннями:

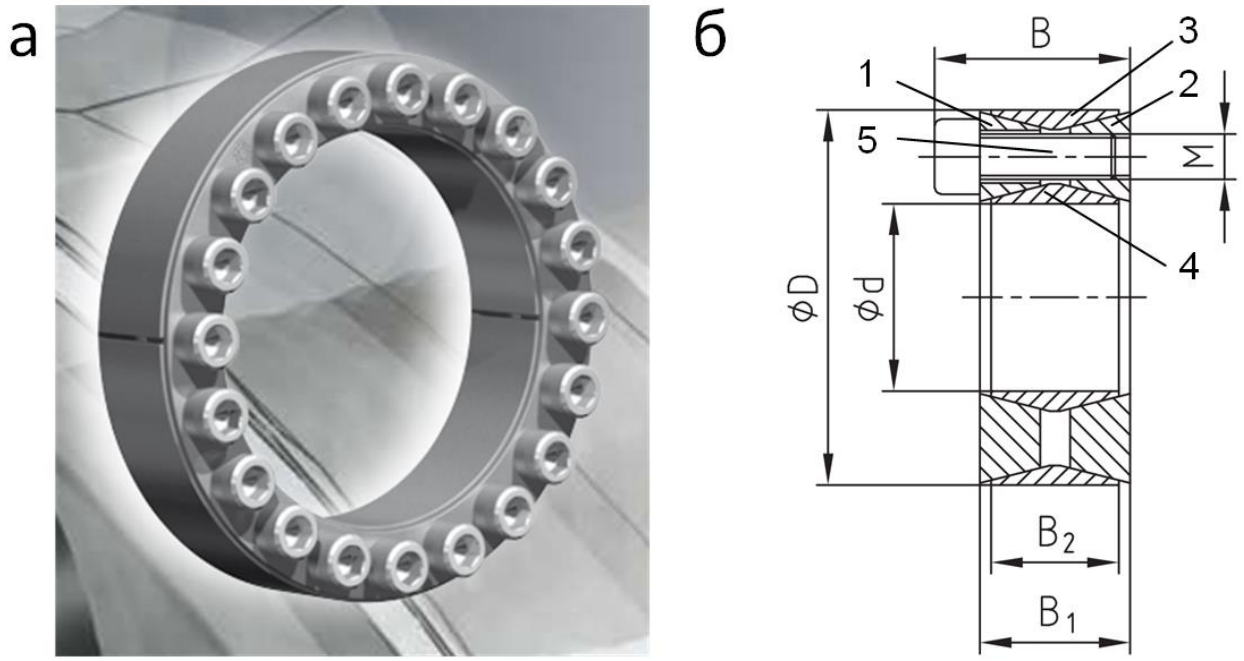


Рисунок 7.8 – Швидкоз'ємна затискна втулка

а – загальний вигляд; б – схема пристрою;

1 – переднє натискне кільце; 2 – заднє натискне кільце; 3 – зовнішнє кільце (з прорізом); 4 – внутрішнє кільце (з прорізом); 5 – гвинти з циліндричною головкою по DIN912

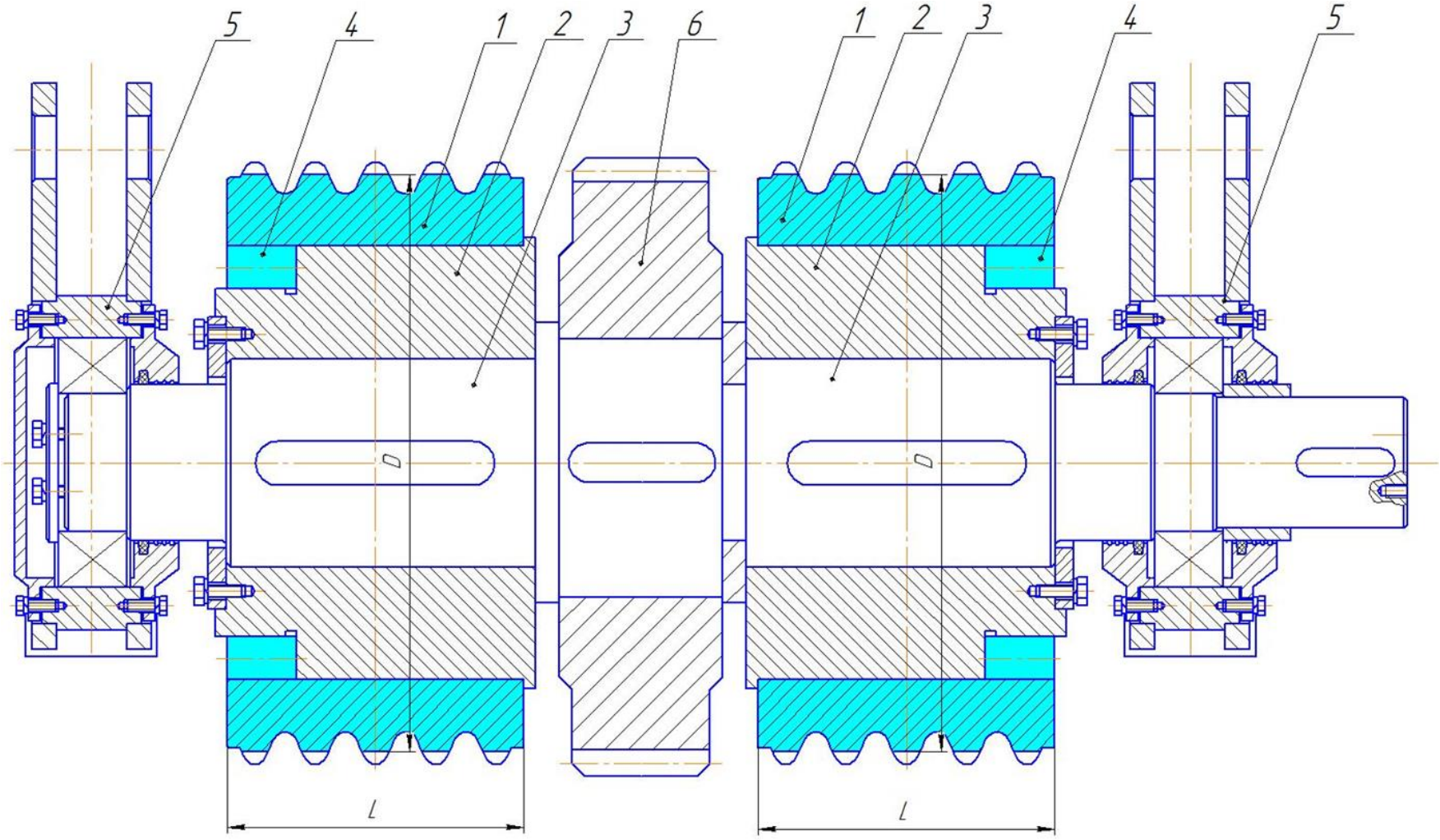


Рисунок 7.9 – Принципове конструктивне рішення валка вдосконаленого пресу

1 – змінний профільований бандаж; 2 – ступиця; 3 – валок; 4 – швидкоз'ємні кріпильні елементи (затискні втулки);

5 – підшипникові опори; 6 – зубчасте колесо синхронізуючої передачі

1. Конструктивне виконання валків преса з двома кільцевими бандажами, розділеними між собою колесом зубчастої синхронізуючої передачі дозволяє суттєво збільшити продуктивність преса не ускладнюючи принципову схему організації подачі шихти у міжвалковий простір.
2. Розташування зубчастого колеса синхронізуючої передачі в центрі валків (рис. 7.9), а не на консолі, як в попередній конструкції (рис. 7.6), усуває додатковий згинальний момент на валку і забезпечує більш рівномірно розподілену передачу крутного моменту до кожного бандажа валка.
3. Компонувальне рішення валків дозволяє задіяти практично без конструктивних змін бандажі, розроблені для більш ранніх моделей пресів конструкції ІЧМ, що є одним з кроків на шляху створення уніфікованих деталей і вузлів пресів, які розробляються в Інституті. Використання швидкоз'ємних кріпильних елементів (рис. 7.8) у вигляді системи затискних кілець для фрикційного, розбірного з'єднання вал-ступиця має ряд переваг перед іншими варіантами монтажу деталей на валок преса:

- при затиску допуски компенсуються, таким чином створюється жорстке з'єднання, яке забезпечує беззазорну та зносостійку передачу крутного моменту, допускає наявність значних осьових зусиль у порівнянні зі з'єднанням з геометричним замиканням, наприклад, з використанням шпонки, що збільшує надійність і ресурс експлуатації валкового блоку пресу;
- зниження витрат при конструюванні, виготовленні та складанні валків преса за рахунок простоти геометрії посадочних місць і застосування стандартних інструментів для установки та демонтажу деталей з використанням для кріплення швидкоз'ємних затискних втулок;
- можливість затягування на певний передаваємий крутний момент забезпечує захист від перевантаження деталей і вузлів пресу завдяки прослизанню кілець при перевищенні максимально допустимого значення за технічними характеристиками преса моменту пресування.

Збільшення геометричних розмірів валків з метою підвищення продуктивності преса до 40...50 т/годину брикетів, а також заданий номінальний тиск пресування

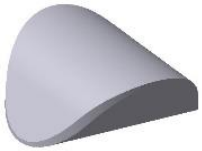
150 МПа призводить до зростання сумарного зусилля пресування, що враховано при проектуванні валу, підшипникових опор і несучих елементів преса.

На рис. 7.10 представлений загальний вид валка преса вдосконаленої конструкції. Даний валок має ширину робочої поверхні однієї пари бандажів 360 мм, сумарна ширина робочої поверхні валків преса становить 720 мм.

При виготовленні змінних бандажів можливі різні варіанти формуючих елементів. В даний час на базі багаторічного практичного досвіду фахівців ІЧМ виділено кілька типорозмірів формуючих елементів, які застосовуються при виготовленні змінних бандажів для валкових пресів конструкції ІЧМ, що дозволяють отримувати брикети «пельменеподібної» форми (табл. 7.1).

З урахуванням цих типорозмірів формуючих елементів обчислені показники продуктивності в залежності від щільності брикетів і частоти обертання валків. Результати розрахунку представлені у вигляді графіків на рис. 7.11. При розрахунку продуктивності преса частоти обертання валків 9,8; 6,18 і 3хв$^{-1}$ прийняті, виходячи з таких міркувань. Як правило частота обертання валків пресів конструкції ІЧМ не перевищує 10 хв$^{-1}$, що обумовлено багаторічним досвідом брикетування широкої номенклатури дрібнофракційних матеріалів.

Таблиця 7.1 – Форма та розміри брикетів

Форма	Тип формуючого елементу	Розміри, мм	Об’єм, см^3
«Пельменеподібна» 	R14	32,0x30,0x15,0	10...11
	R17	40,0x38,5x18,5	19...20
	R24	63,6x60,0x27,0	48...50

При цьому, окремі технології, для отримання якісних брикетів вимагають зменшення швидкості деформації за рахунок зниження частоти обертання валків в 2...3 рази. Таке зниження частоти обертання валків може здійснюватися, як плавно, з використанням частотного перетворювача в системі управління приводом, так і дискретно за допомогою змінних шківів клиноремінної передачі.

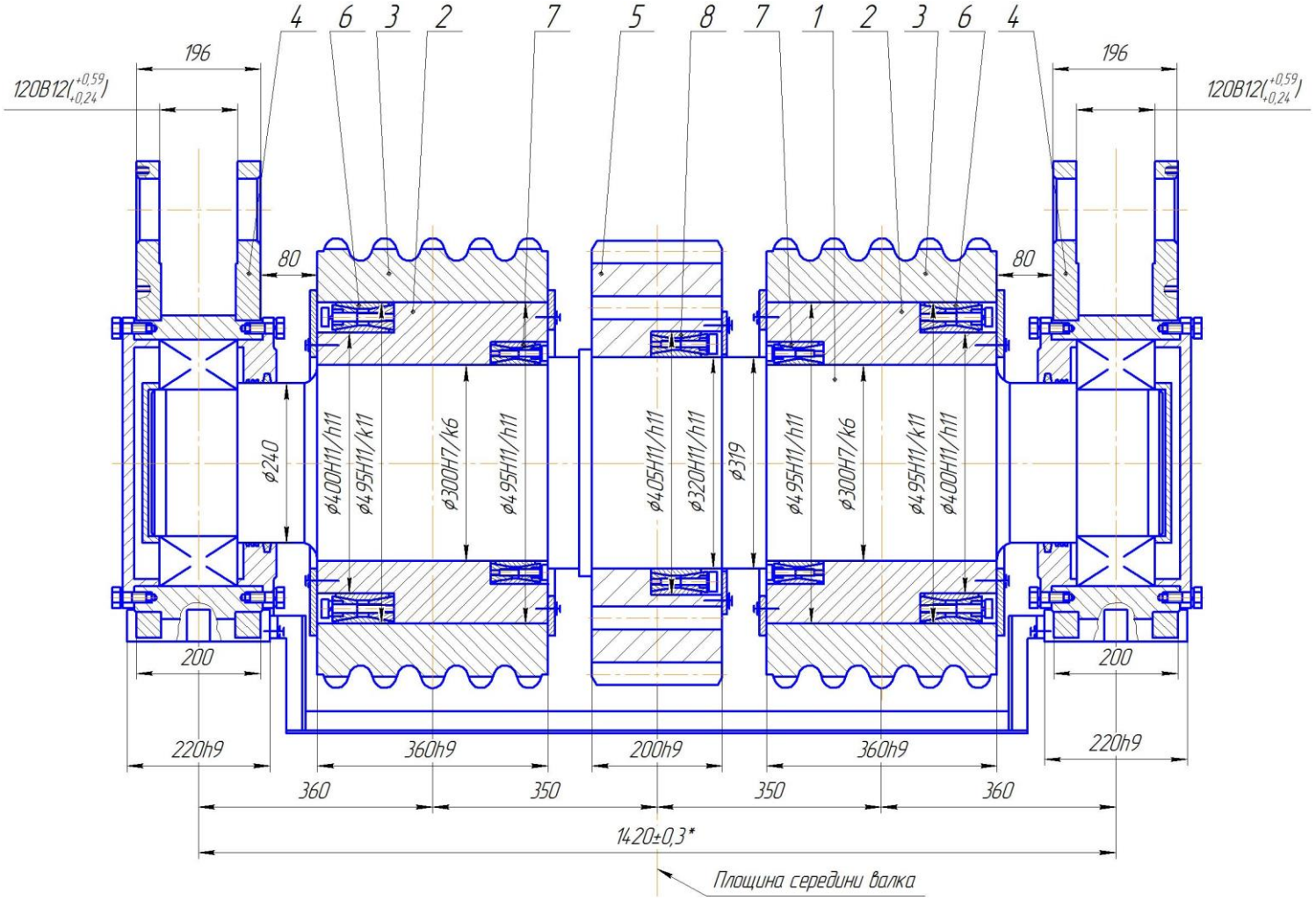


Рисунок 7.10 – Конструктивне рішення валка вдосконаленої моделі преса

1 – вал; 2 – ступиця; 3 – змінний профільований бандаж; 4 – підшипникові опори; 5 – зубчасте колесо синхронізуючої передачі; 6, 7, 8 – швидкоз’ємні затискні втулки

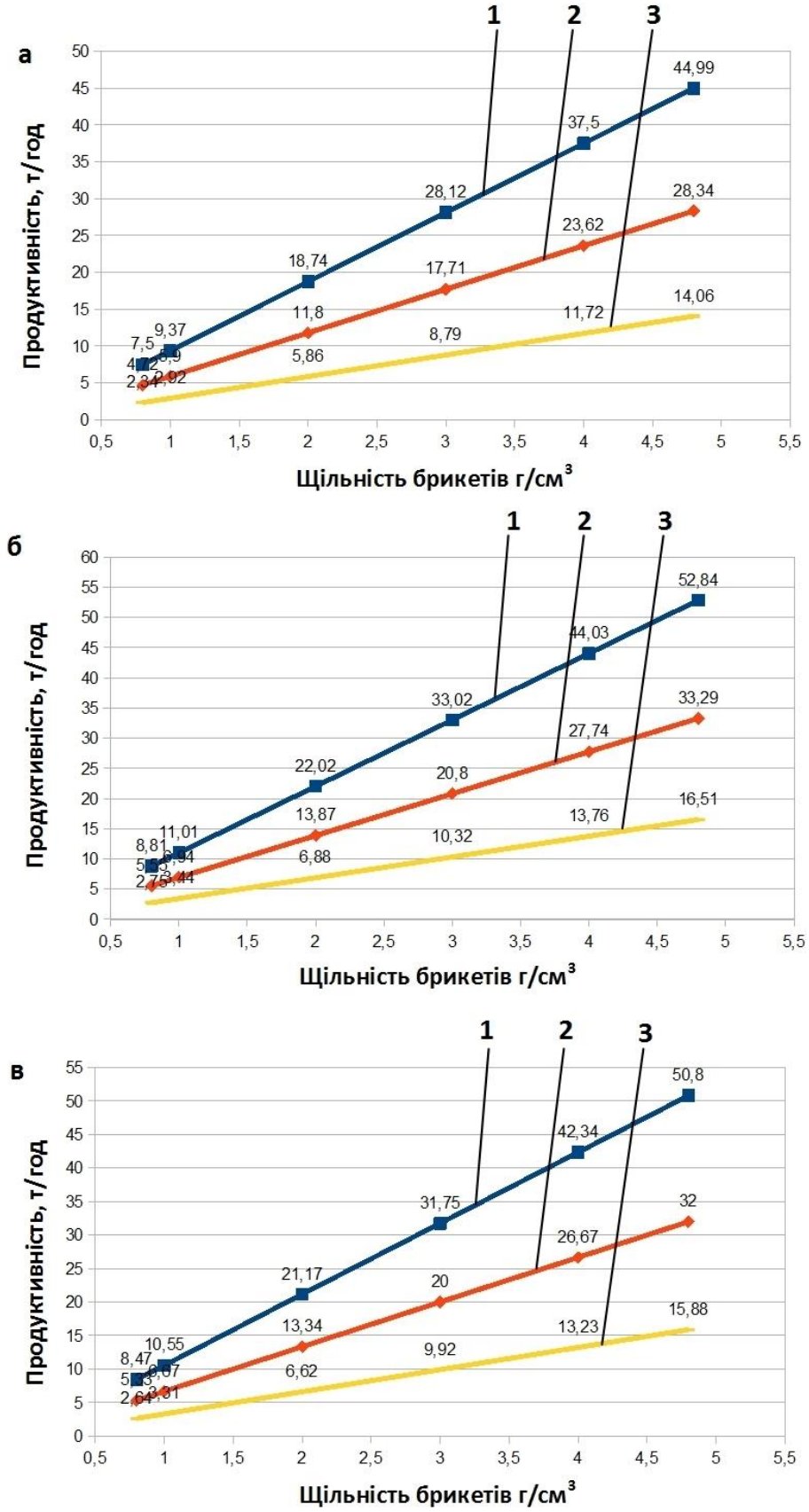


Рисунок 7.11 – Розрахункові параметри продуктивності преса з шириною робочої поверхні 2х360 мм для різних типів формуючих елементів і частоти обертання валків:

а – R14; б – R17; в – R24; 1 – 9,8 хв$^{-1}$; 2 – 6,18 хв$^{-1}$; 3 – 3 хв$^{-1}$

Як правило, в конструкції валкових пресів ІЧМ застосовуються шківи, які дозволяють знизити частоту обертання валків з ≈9 хв$^{-1}$ до ≈6 хв$^{-1}$ і ≈3 хв$^{-1}$, відповідно, що відображено на графіках рис. 7.10. Дані графіки чітко показують, що застосування запропонованої в роботі компонувальної схеми преса та конструктивного виконання валків дозволяє вирішити задачу забезпечення високої продуктивності валкового пресу для широкої номенклатури дрібнофракційних матеріалів – до 25...50 т/годину.

В даний час у зв'язку з розвитком сфери застосування в народному господарстві України альтернативних джерел енергії у підприємств зростає інтерес до придбання високопродуктивного пресового обладнання для виробництва брикетів з легких паливних матеріалів: торф, буре вугілля, лігнін, деревна стружка, тощо. Дані матеріали мають малу насипну щільність і значний ступінь ущільнення – коефіцієнт ущільнення ≥3. Для таких матеріалів показниками високої продуктивності є отримання ≥2 т/годину брикетів. При цьому більшість підприємств, зацікавлених в придбанні високопродуктивних пресів для паливно-енергетичного комплексу, вказують необхідну продуктивність 3...10 т/годину, при щільності брикетів від 0,8 до 1,4 г/см^3.

На території нашої країни зазначені матеріали брикетуються, як правило, на низькопродуктивних (до 1 т/годину) пресах шнекового типу, або гідравлічних. Торф’яні брикети отримують на кривошипно-поршневих пресах, які забезпечують досить високу продуктивність за даним типом сировини – 4...5 т/годину, але при цьому мають високу метало- та енергоємність. Так, один такий прес має масу до 62 т та потужність приводу до 130 кВт. Крім того, ці преси на даний момент практично не випускаються, т. ч. мова йде про експлуатацію і ремонт, фактично, застарілого нестандартного обладнання. Брикети, одержувані на таких пресах, за габаритними розмірами і формою близькі до стандартної будівельної цегли, що часто створює багато незручностей з їх використанням. Кращим є отримання брикетів, які мають форму близьку до еліпсу, з огляду на це брикети пельменеподібної форми, одержувані на валкових пресах конструкції

ІЧМ в даному варіанті, є більш прийнятними ніж брикети циліндричної форми або у вигляді паралелепіпеду, які отримуються на штемпельних пресах.

У зв'язку з раніше сказаним, в роботі розглядається варіант оснащення преса пристроєм для попереднього ущільнення шихти (підпресовника) з метою забезпечення можливості брикетування матеріалів з малою насипною щільністю – ≤0,5 г/см^3.

Використання вказаного пристрою в обов'язковому порядку призведе до зростання енергосилових параметрів процесу брикетування в осередку деформації валкового пресу, що при збереженні ширини валків неминуче призведе до необхідності зміни лінії приводу і погіршення розподілу навантажень уздовж робочих поверхонь валків. Для вирішення даної проблеми запропоновано технічне рішення, яке дозволяє забезпечити підвищений ресурс експлуатації пресу і надійність його роботи із забезпеченням рівномірного розподілу навантажень на робочі поверхні валків.

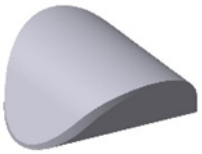
В основу даного рішення покладена прийнята раніше в роботі концепція конструктивного рішення рами пресу і опори валкового блоку (див. рис. 7.5), яка дозволяє здійснювати компоновку між собою різних варіантів приводу і валкових блоків. Запропоновано варіант конструкції валків (рис. 7.11) з несучою здатністю підшипникових вузлів рівною тій, що і у валків, представлених на рис. 7.10, але при цьому зменшена ширина робочих поверхонь валків. Зменшення робочої ширини пари бандажів з 360 мм до 200 мм і сумарної робочої поверхні валків пресу з 720 мм до 400 мм при незмінній здатності до навантаження підшипникових вузлів дозволяє при збереженні елементів лінії приводу і несучих елементів подушок валків сприймати валками преса більш високі значення тиску пресування в осередку деформації — орієнтовно вище у 1,5 рази. Це як раз і відкриває можливість оснащення преса пристроєм для попереднього ущільнення, при цьому забезпечуючи тривалий ресурс експлуатації підшипників та інших елементів валкового блока.

При цьому слід зазначити, що прийняте в роботі компонувальне рішення преса – валки з роздвоєною робочою поверхнею потребують для здійснення попереднього

ущільнення шихти в осередку деформації установки двох ідентичних підпресовників, що буде враховано при створенні преса.

При розробці бандажів для валків пресу зі зменшеною шириною робочих поверхонь, представлених на рис. 7.11, замість раніше застосовуваних на валкових пресах ІЧМ, формуючих елементів R24 був розроблений новий тип R25 (табл. 7.2, рис. 7.12). Необхідність створення нового формуючого елемента обумовлена тим, що розміщення раніше застосовуваних елементів R24 на бандажі шириною 202 мм призводить до того, що товщина реборд, які примикають до крайніх від торців рядів формуючих елементів становить менше 3 мм. Така мала товщина реборд бандажів при великих навантаженнях і розвитку зносу, як показує практичний досвід, призводить до сколів даних ділянок бандажів. Застосування створених в роботі формуючих елементів типу R25 дозволило при збереженні об'єму брикету, за рахунок зміни геометричних співвідношень профілю пресуючих калібрів, збільшити товщину реборди до ≈10 мм, що забезпечує надійність і тривалий ресурс експлуатації бандажів.

Таблиця 7.2 – Форма та розміри брикетів

Форма	Тип формуючого елементу	Розміри, мм	Об’єм, см^3
«Пельменеподібна» 	R14	32,0x30,0x15,0	10...11
	R17	40,0x38,5x18,5	19...20
	R25	58,5x58,5x25,5	48...50

Для запропонованої конструкції валків (202 мм×2) виконаний розрахунок продуктивності преса в залежності від щільності брикетів, частоти обертання валків і типу формуючих елементів (табл. 7.2), графічно результати представлені на рис. 7.13.

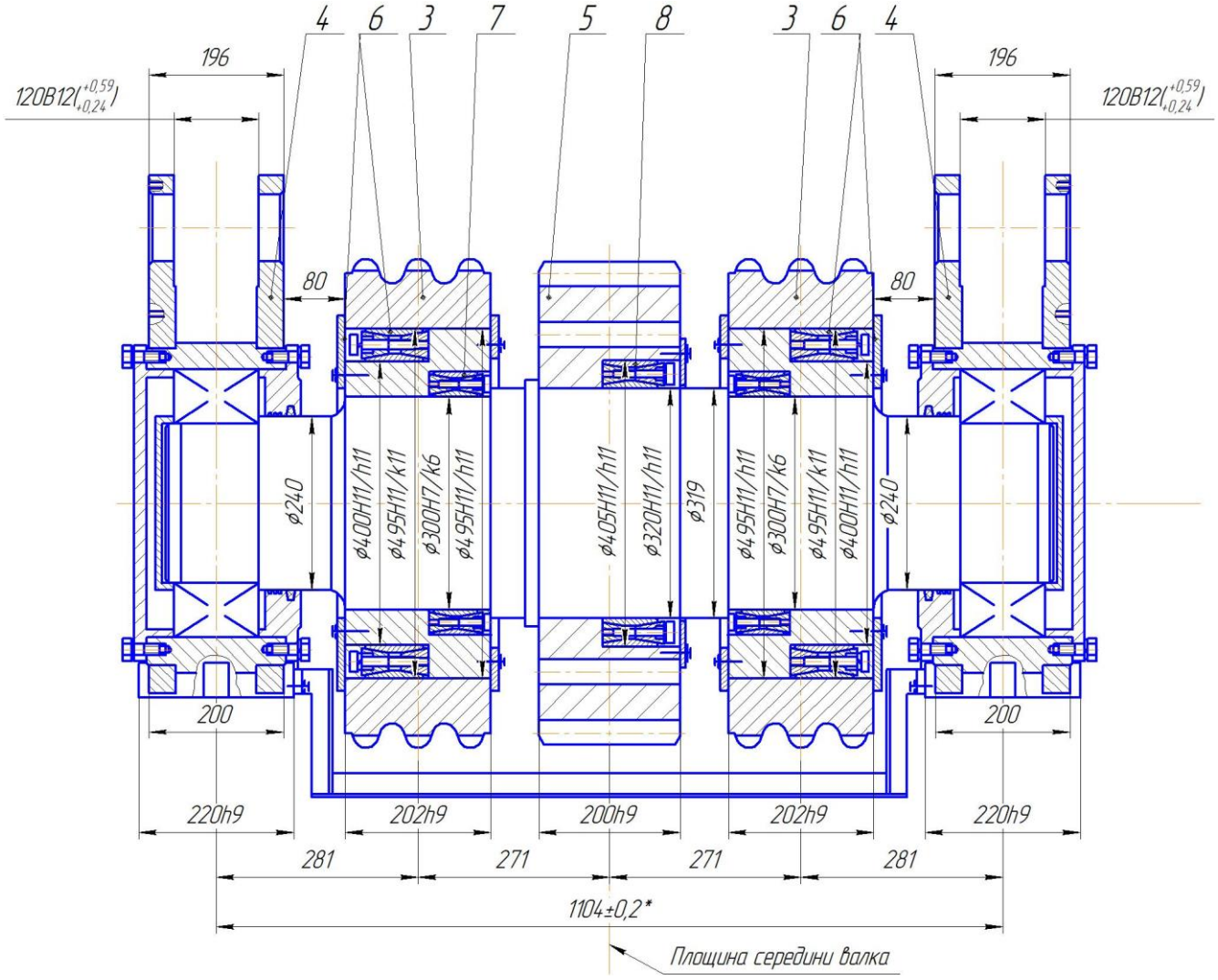


Рисунок 7.11 – Конструктивне рішення валка вдосконаленої моделі преса зі зменшеною шириною пресуючих поверхонь

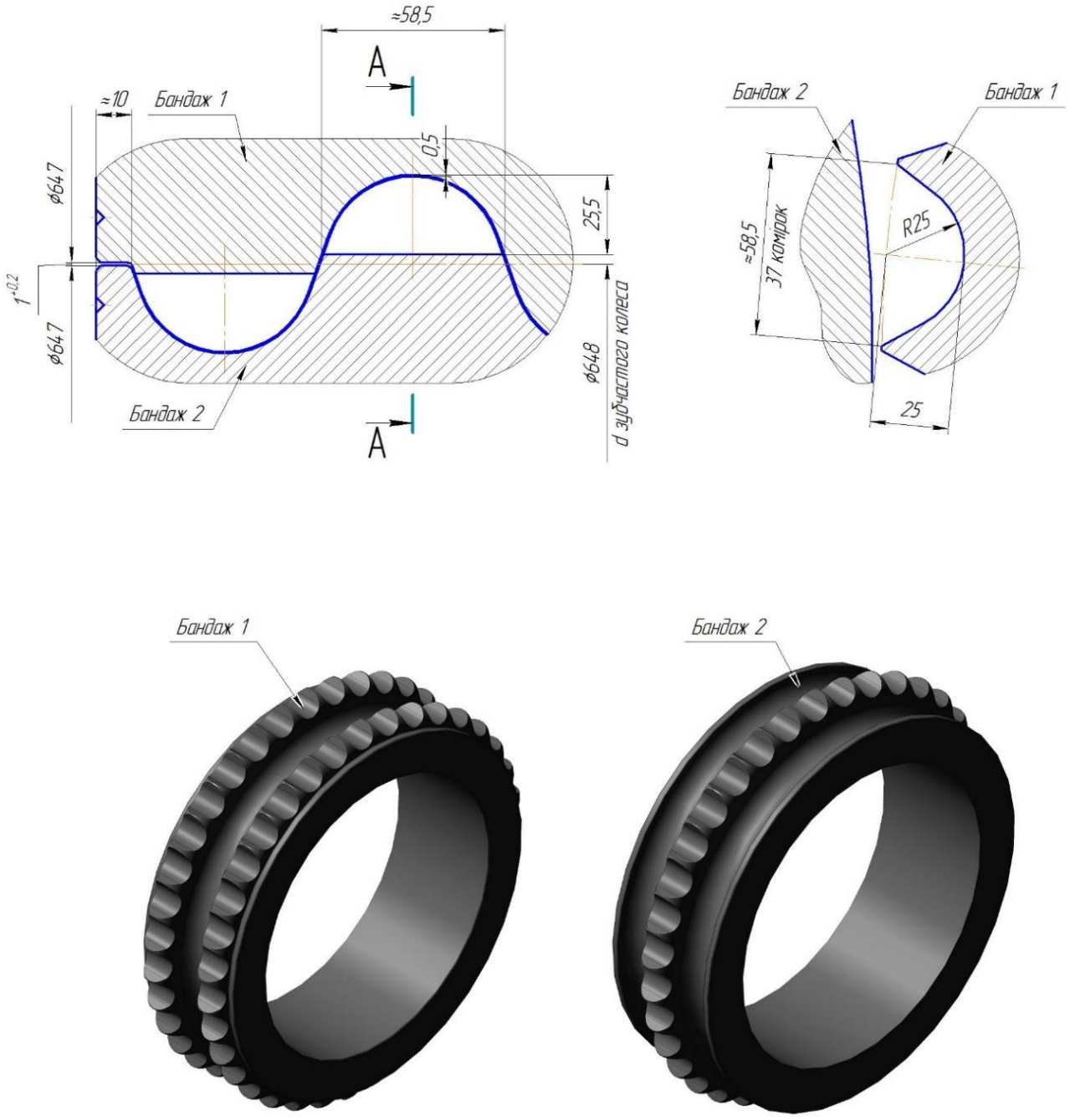


Рисунок 7.12 – Формуючий елемент R25

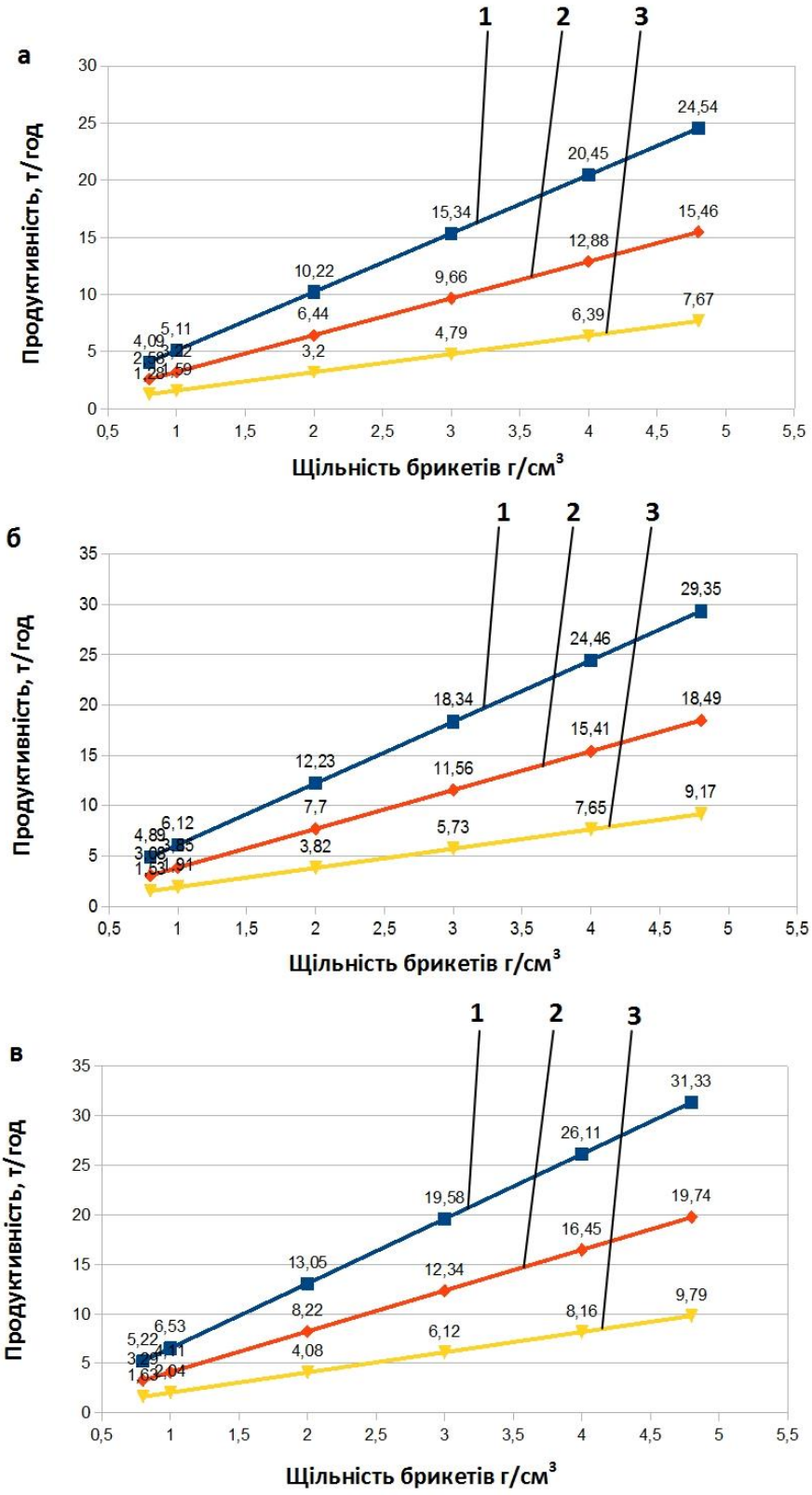


Рисунок 7.13 – Розрахункові параметри продуктивності пресу з шириною робочої поверхні 2×202 мм для різних типів формуючих елементів і частоти обертання валків:
а – R14; б – R17; в – R24; 1 – 9,8 хв$^{-1}$; 2 – 6,18 хв$^{-1}$; 3 – 3 хв$^{-1}$

Графіки, представлені на рис. 7.13 показують, що використання валків конструкції, наведеної на рис. 7.11. при отриманні брикетів щільністю 0,8...1,4 г/см^3 з легких матеріалів (насипна щільність 0,3...0,5г/см^3) забезпечують продуктивність до 10 т/годину. Тобто, валковий прес, оснащений даними валками і шнековим підпресовником дозволяє забезпечити затребувану на сьогодні багатьма торфобрикетними і вугільними підприємствами продуктивність – 3...10 т/годину. При цьому максимальна продуктивність для всього діапазону матеріалів, які переробляються на валкових пресах досягає 31,33 т/годину, при щільності брикетів 4,8 г/см^3.

7.2.3. Гідравлічна система пристрою захисту валків від перевантаження

Гідравлічна система захисного пристрою валкового преса, представлена на рис. 7.14, призначена для створення насосом Н (з ручним приводом) необхідного тиску робочої рідини (мінерального масла) в гідравлічних циліндрах (демпферах) Ц1, Ц2 з метою забезпечення врівноваження зусилля пресування (розпірного зусилля), і, отже, підтримки стабільності силових режимів брикетування. Система забезпечує контроль тиску робочої рідини в гідродемпферах з використанням сигналізуючого манометра МН2. При падінні тиску масла в гідросистемі або, навпаки, при перевищенні номінального робочого зусилля пресування, внаслідок подачі в осередок деформації некондиційної шихти, подається сигнал в електричну схему приводу преса для зупинки двигуна з метою захисту від поломки деталей і вузлів преса.

Пневмогідроакумулятор ГА призначений для накопичення робочої рідини при аварійному відключенні преса внаслідок перевищення тиску масла в Ц1 і Ц2 при зростанні зусилля пресування вище номіналу.

Зарядка пневмогідроакумулятора ГА виконується азотом технічним під тиском 10 МПа.

Клапан запобіжний КП призначений для захисту гідросистеми при перевищенні тиску масла вище робочого значення за рахунок збільшення розпірного зусилля в осередку деформації преса. Контроль тиску налаштування КП виконується за допомогою манометра МН2.

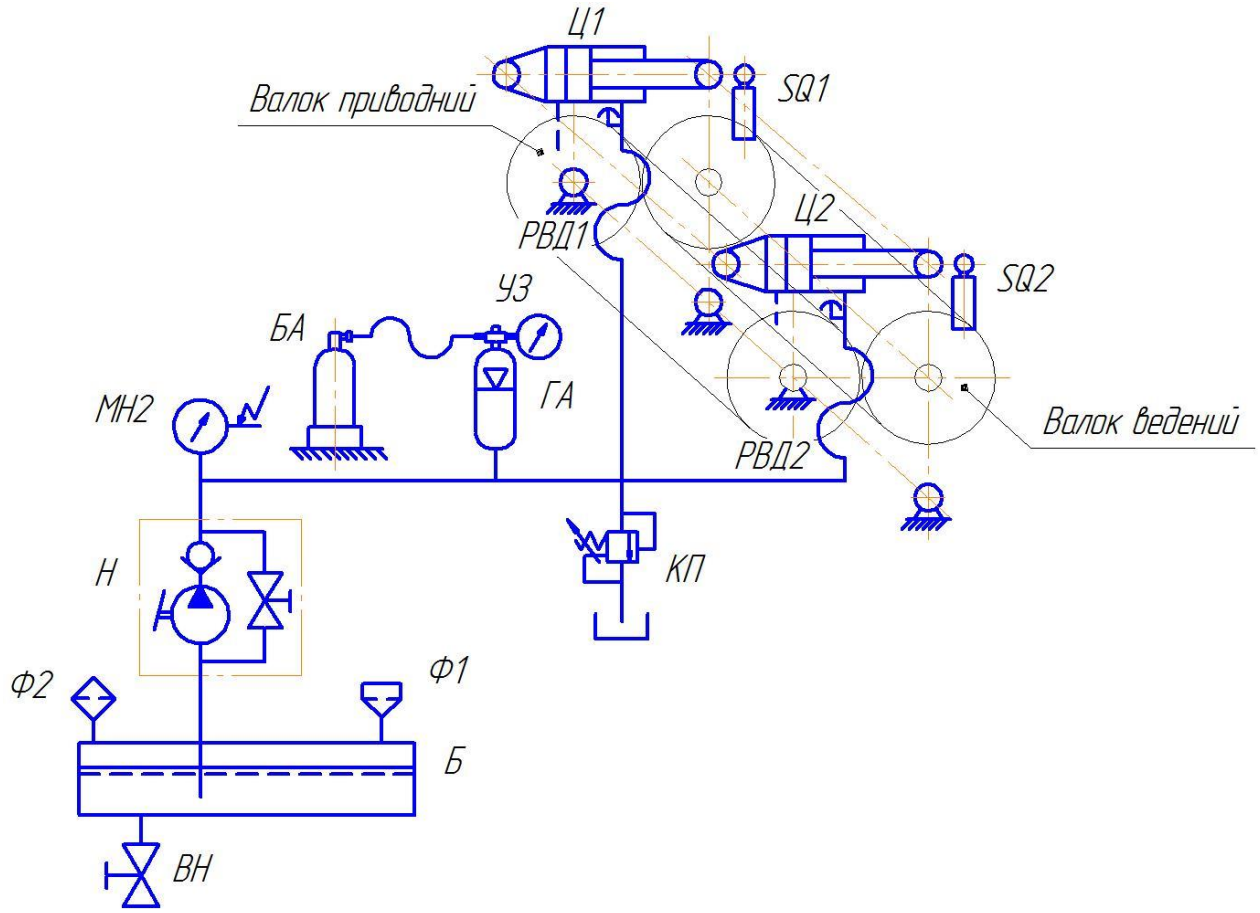


Рисунок 7.14 – Гідравлічна схема захисного пристрою валкового преса від перевантажень

Б – бак; Н – насос; Ц1, Ц2 – гідроциліндр; ГА – пневмогідроакумулятор; УЗ – пристрій зарядний АР04/320-04А; БА – балон, газ – азот технічний 2 сорту ГОСТ 9293-74; РВД1, РВД2 – рукав високого тиску тип 4SP DN12; КП – клапан запобіжний; МН2 манометр сигналізиуючий ЭКМ 2У; ВН – вентиль муфтовий; Ф1 – фільтр заливний; Ф2 – фільтр всмоктуючий (сапун); SQ1, SQ2 – безконтактний вимикач

Клапан зворотний в насосі Н забезпечує герметичність гідросистеми, підтримуючи робочий тиск масла в гідроциліндрах Ц1, Ц2 без постійної роботи насоса Н.

Для зниження тиску масла в Ц1, Ц2 призначений вентиль (з ручним приводом) в насосі Н, що зливає масло з гідроциліндрів в бак Б.

Безконтактні вимикачі SQ1, SQ2 забезпечують захист пресу при перевищенні розпірного зусилля, реагуючи при цьому на відхилення подушок рухомого валка з робочого положення в аварійне, подаючи електричний сигнал в електросхему двигуна преса для його зупинки.

У вдосконаленому валковому пресі конструкції ІЧМ основними елементами системи захисту валків від перевантажень є індивідуально запроектовані гідроциліндри поршневого типу. При створенні цих пристроїв виходячи з значення максимального зусилля пресування вирішено задачу забезпечення тривалого ресурсу їх експлуатації при мінімально можливих габаритах, надійності і зручності монтажу і експлуатації.

У валкових брикетних пресах, як правило, пристрої для захисту від перевантажень встановлюють на лінії центрів валків, що відповідає положенню сприйняття реального навантаження на валки. З конструктивних міркувань встановлювати захисні пристрої на лінії центрів валків є найбільш зручним та логічним з точки зору його налаштування на задане зусилля пресування. Однак, встановлення захисного пристрою в зазначеному положенні не є кращим з точки зору збільшення його габаритних розмірів, викликаних підвищенням жорсткості пружних елементів, які сприймають зусилля пресування. У зв’язку з цим доцільним є встановлення захисних пристроїв на деякій відстані від лінії центрів валків, де навантаження на них буде істотно нижчим ніж реальне, яке виникає по лінії центрів валків. При цьому ступінь зменшення навантаження буде визначатися відстанню віддалення від лінії центрів валків. Компонувальне рішення валкових пресів конструкції ІЧМ побудовано за таким принципом, який якраз і дозволяє розмістити демпфера захисного пристрою вище лінії центрів валків. Для цього один з валків пресу жорстко закріплений в рамі, а інший

шарнірно, з можливістю відхилення від вертикальної осі при перевантаженнях. Це дає перевагу у порівнянні з валковими пресами інших розробників, так як дозволяє знизити металоємність і навантаженість пристрою для захисту валків від перевантажень. Схематично таке конструктивне рішення представлено на рис. 1.13 (див. Розділ 1).

Для даного захисного пристрою спроектований гідроциліндр, загальний вигляд якого наведено на рис. 7.15. Основні технічні характеристики гідроциліндра (демпфера) наведені в табл. 7.3.

Таблиця 7.3 – Технічні характеристики гідроциліндра (демпфера) захисного пристрою валкового преса

Тиск масла в штоковій порожнини, МПа	Робоче	23,8
	Випробування	28
Основні розміри, мм	Діаметр штоку	80
	Діаметр поршню	200
	Хід штоку	30
Зусилля на штоку, тягнуче, номінальне, кН		630
Робоча площа «шток-поршень», см^2		≈264
Робоча рідина		Масло ІГП-30 ТУ 38-101413-78

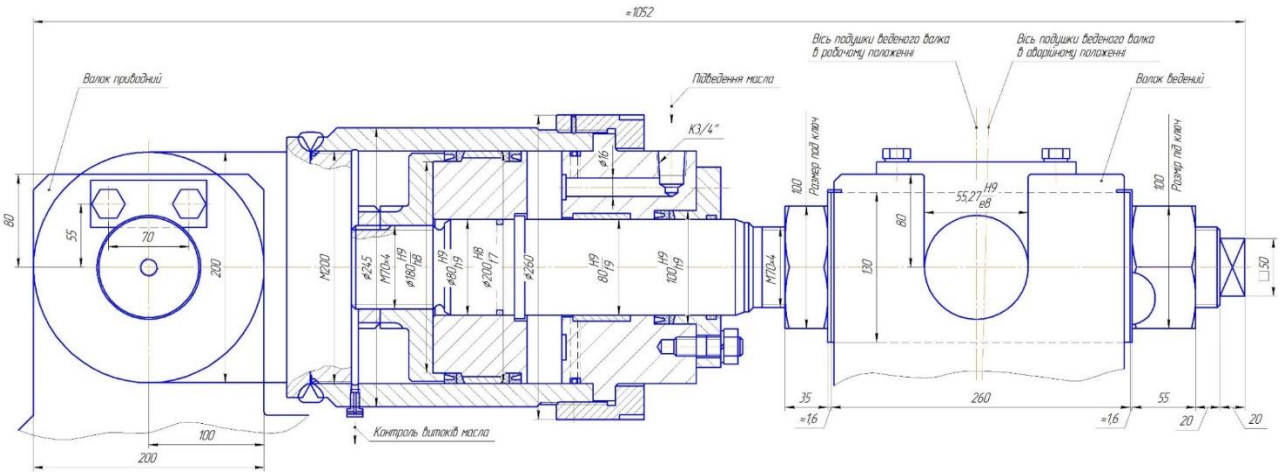


Рисунок 7.16 – Загальний вигляд гідроциліндру (демпфера) захисного пристрою валкового преса

Проведено інженерні розрахунки з урахуванням основних технічних характеристик демпферів і гідроакумулятора та виконана конструкторська розробка маслостанції для гідравлічної системи захисту валків пресу від перевантажень. Загальний вигляд маслостанції наведено на рис. 7.17. На рис. 7.18 показана схема установки гідрообладнання на прес.

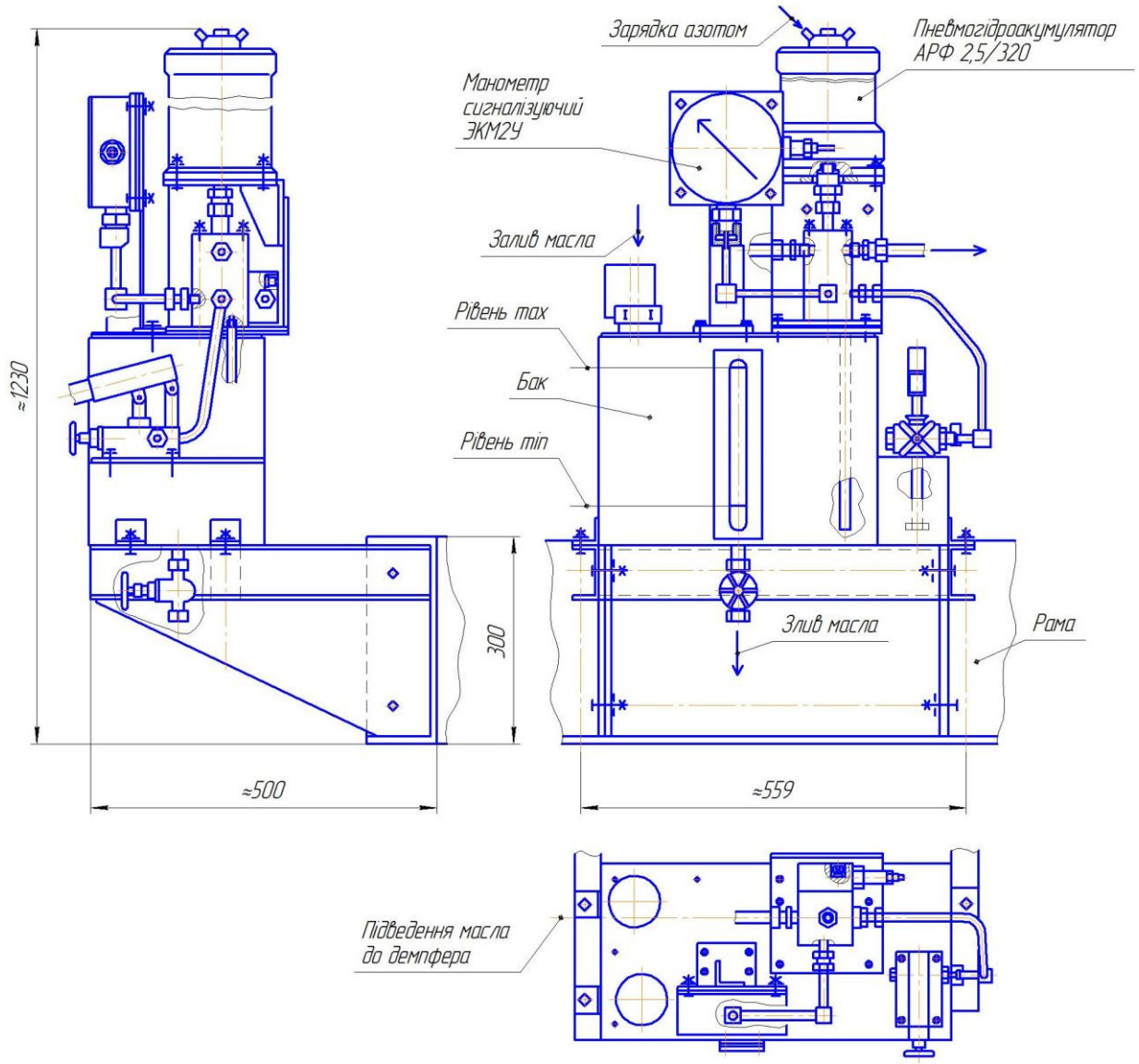


Рисунок 7.17 – Маслостанція захисного пристрою валкового преса

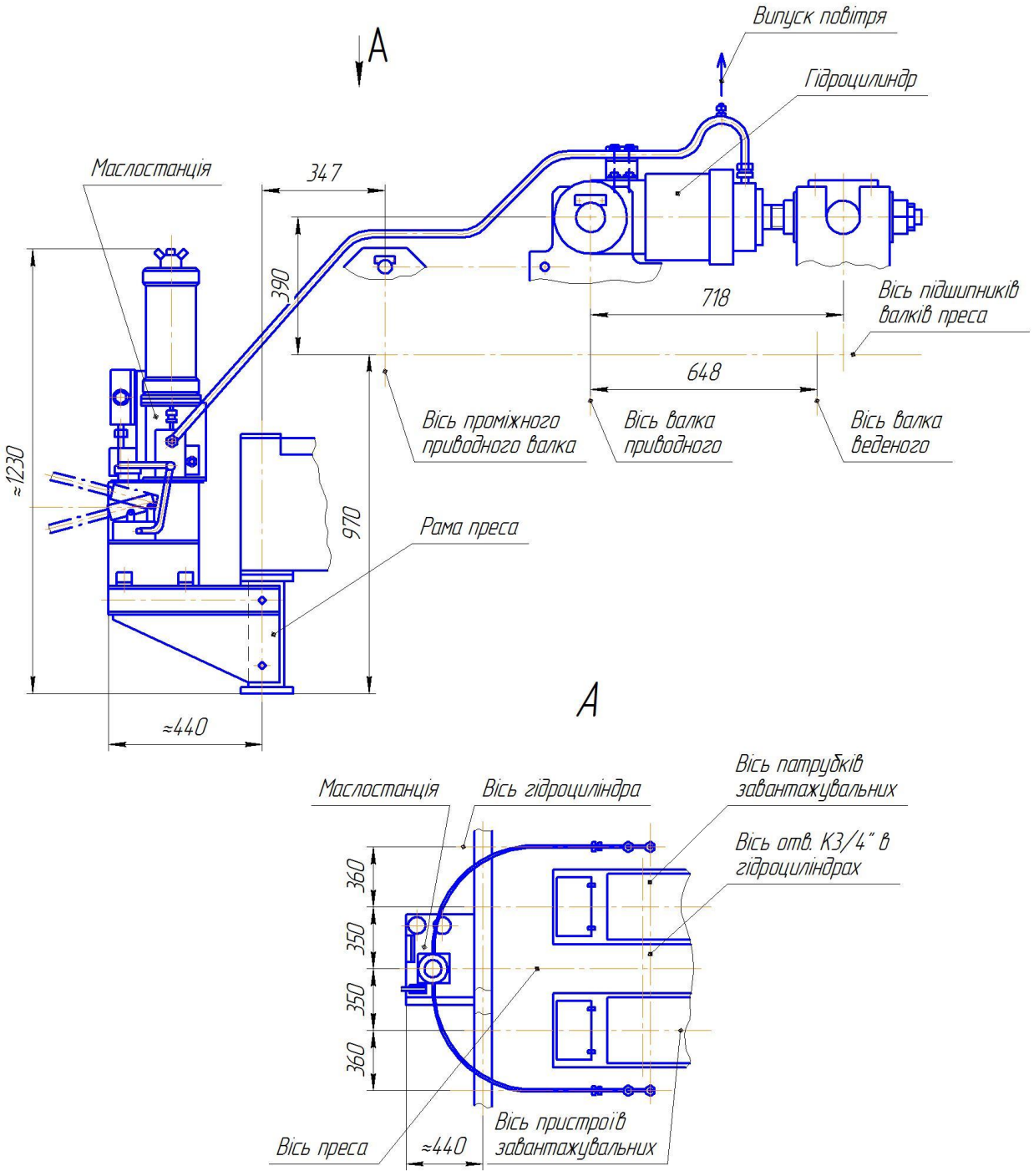


Рисунок 7.18 – Схема установки гідрообладнання захисного пристрою валкового преса

7.2.4. Шнековий підпресовник

На основі запропонованої в роботі методики та матеріалів, викладених в роботах [187-190,193,194], виконано розрахунки шнекового механізму попереднього ущільнення шихти – шнекового підпресовника. Враховуючи те, що шнековими пристроями оснащуються валкові преси, що брикетують матеріали з малою насипною щільністю (0,3…0,6 г/см^3) в якості дрібнофракційного матеріалу, фізико-механічні характеристики якого враховані при проведені розрахунків, прийнятий торф. Насипна щільність торфів, які видобуваються на території нашої країни, становить 0,3…0,6 г/см^3 при вологості від 10 до 25%.

Вхідні дані для проектування шнекового підпресовника (рис. 7.18):

1. Матеріал, що брикетується – торф.
2. Насипна щільність ρ_{bulk} – 0,327 г/см^3.
3. Коефіцієнт тертя по сталі f – 0,6.
4. Кут зовнішнього тертя φ_1 – 30°57’.
5. Зовнішній діаметр шнеку D_{scr} – 169 мм.
6. Діаметр валу шнеку d_{scr} – 60 мм.
7. Шаг шнеку середній S_{scr} – 120 мм.
8. Товщина стрічки шнеку S_0 – 4 мм.
9. Довжина шнеку l_{scr} – 410 мм.
10. Висота стовпа матеріалу перед шнеком h_{bulk} – 100 мм.

За результатами розрахунків створений та випробуваний в промислових умовах шнековий підпресовник (що підтверджується відповідним актом, наведеним в додатках до дисертації). Основні технічні характеристики підпресовника представлені в табл. 7.4. На рис. 7.19 представлене конструктивне виконання підпресовника, а на 7.20 – промисловий прес, оснащений даним механічним пристроєм. Для поліпшення умов подачі матеріалу в шнек ділянка завантаження рис. 7.21 виготовлена з урахуванням кутів природного укосу більшості матеріалів, які брикетуються на валкових пресах.

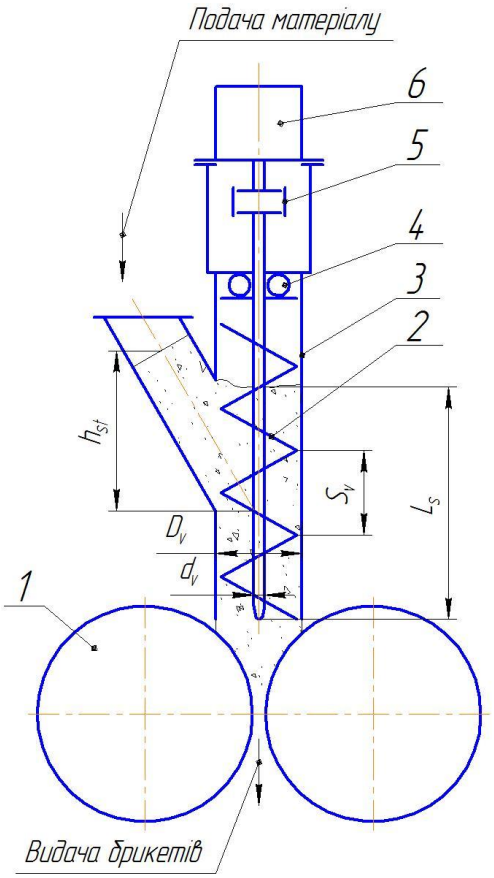


Рисунок 7.18 – Принципова схема механізму попереднього ущільнення шихти

1 – прес валковий; 2 – шнек (гвинт); 3 – корпус; 4 – підшипник упорний;

5 – муфта зубчаста; 6 – мотор-редуктор

Таблиця 7.4 – Основні технічні характеристики механізму попереднього ущільнення шихти вдосконаленого валкового преса конструкції ІЧМ

Осьове зусилля на шнеку, теоретичне, кН		3,92
Крутний момент на валу шнека, кН·м		298,7
Мотор-редуктор	тип	МЧФ-160М-112-11-52-1-2-У3
	типорозмір електродвигуна серії AIP	132М4
	потужність електродвигуна, кВт	11,0
	передавальне число	8,3
	номінальний крутний момент на вихідному валу, Н·м	870
Теоретична частота обертання шнека, $хв^{-1}$		112
Маса, кг		≈500

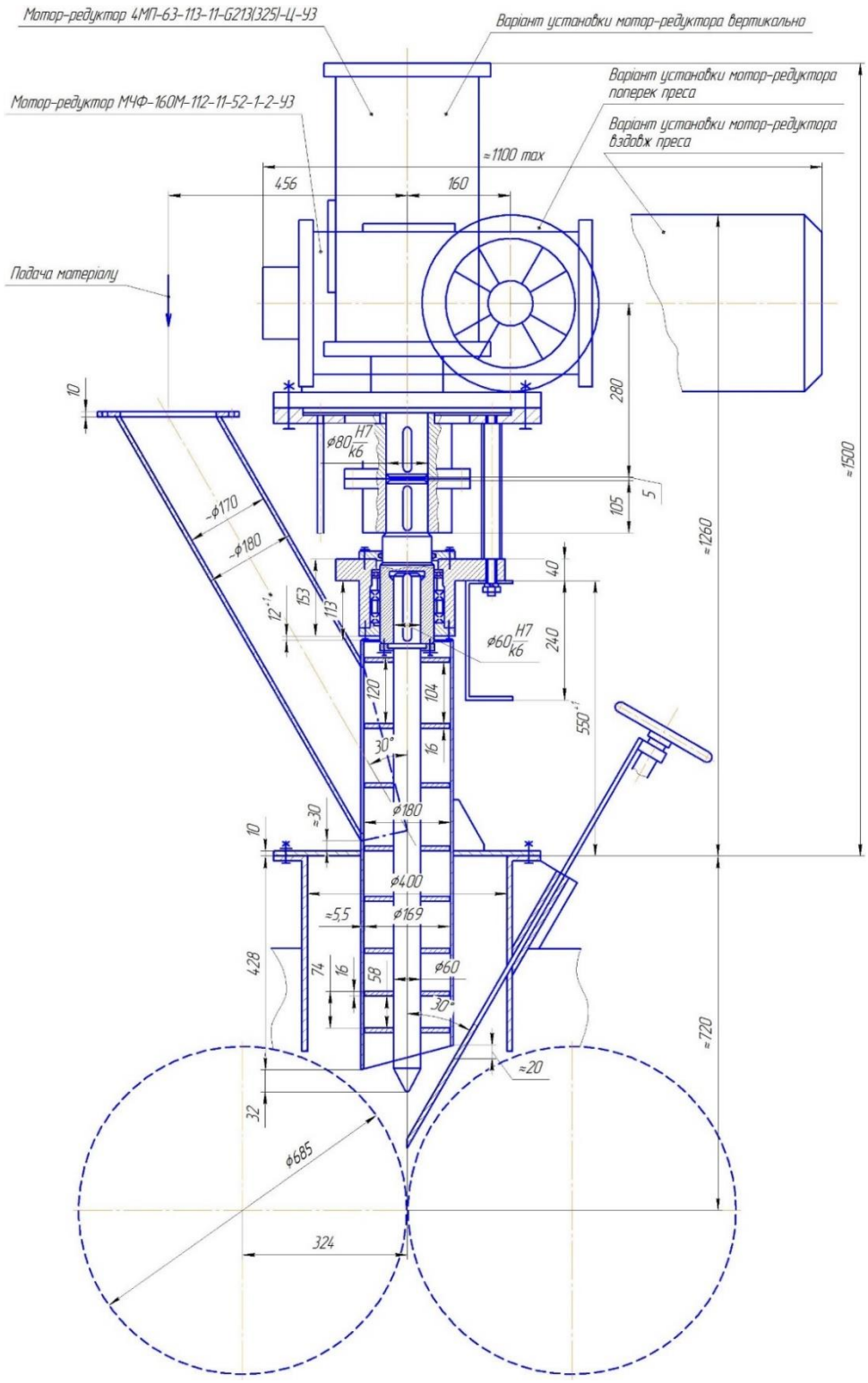


Рисунок 7.19 – Загальний вигляд механізму попереднього ущільнення шихти для вдосконаленого валкового преса конструкції ІЧМ



Рисунок 7.20 – Загальний вигляд валкових пресів конструкції ІЧМ з підпресовниками



Рисунок 7.21 – Завантажувальна ділянка підпресовника

Випробування створеного в роботі механізму для попереднього ущільнення шихти проведені на наявному в ДП «Експериментально-виробниче підприємство Інституту чорної металургії НАН України» валковому пресі конструкції ІЧМ.

В якості матеріалу що брикетується, використовувалися кілька видів торфу з різних родовищ, що знаходяться на території України. На рис. 7.22 наведена фотографія брикетів, отриманих з використанням створеного в роботі підпресовника.



Рисунок 7.22 – Брикети з торфу, отримані з використанням підпресовника

Брикети мають щільність 1,0...1,26 г/см^3, що відповідає вимогам до торф’яним брикетам. В подальшому заплановані випробування роботи підпресовника на інших матеріалах, що дозволить отримати дані, необхідні для уточнення розрахунків та вдосконалення конструкції підпрессовника.

7.3. Технічні рішення щодо вдосконалення валкових пресів

З використанням технічних рішень, які були розроблені у попередніх розділах роботи, розроблена документація на виготовлення валкового преса вдосконаленої конструкції. Прес розроблений в двох модифікаціях [212].

Перший – для роботи із гравітаційною подачею шихти в осередок деформації та збільшеною шириною робочої поверхні валків (2×360 мм) для досягнення високої продуктивності.

Друга модифікація пресу відрізняється зменшеною шириною робочої поверхні валків (2×202 мм), але оснащена підпресовниками шнекового типу, які дозволяють брикетувати матеріали з малою насипною щільністю (0,3 г/см^3≤), зниженою сипкістю, та які потребують досягнення високих значень коефіцієнту ущільнення (≥3).

Розроблений валковий прес призначений для брикетування дрібнофракційних матеріалів, переважно, фракції 0…5 мм.

За умовами впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища в процесі експлуатації прес відповідає виконанню УХЛ категорії розміщення 4.2 по ГОСТ 15150-69.

Вимоги до шихтових матеріалів:

- розмір частинок шихти, яка брикетується, не повинний перевищувати 5…6 мм;
- фракції більше 6 мм повинні подрібнюватись;
- в матеріалі, який брикетується, не повинно бути сторонніх включень (каменів, металічних предметів ш т. п.).

В табл. 7.5 представлені технічні характеристики створеного в роботі валкового пресу, оснащеного валками з двома парами бандажів із шириною робочої поверхні 2×360 мм. В роботі також створена модифікація преса з двома парами бандажів із шириною робочої поверхні 2×202 мм для роботи із підпресовниками. Як вже вказувалося раніше, ця конструкція дозволяє без зміни лінії приводу преса та максимально допустимого зусилля пресування

забезпечити роботу преса з матеріалами, які потребують високих значень коефіцієнту ущільнення та тиску пресування. Технічні характеристики такого преса представлені в табл. 7.6.

Таблиця 7.5. – Технічні характеристики валкового преса ПБВ20БМ-2-360

Призначення			Виробництво брикетів з дрібнофракційних матеріалів (фр. ~0…5 мм)		
Продуктивність, т/год			до 50		
Зусилля пресування номінальне, кН			2400		
Момент пресування номінальний, кНм			100		
Характеристики валкового блоку	Діаметр бандажів середній, мм		648		
	Ширина робочої поверхні бандажів, мм		360		
	Кількість пар бандажів, шт.		2		
	Частота обертання валків, $хв^{-1}$		9,8		
	Тип формуючих елементів / Кількість формуючих елементів загальна		R24/360	R17/520	R14/756
Характеристики брикетів	Форма		«пельменеподібна»		
	Типорозмір		R24	R17	R14
	Розмір, мм		32×30×15	40×39×19	32×30×15
	Об’єм, $см^3$		~48…50	~19…21	~10…12
Привод	Редуктор	Тип	Ц3Н-630-125-12		
		Передаточне число	125		
		Крутний момент, кН×м	90		
	Модуль/ передавальне число проміжної зубчастої передачі		18/1,2		
	Модуль/ передавальне число синхронізуючої зубчастої передачі		18/1,0		
	Відкрита клиноремінна передача	Ремінь (кільк. шт.)	SPC-2500Ш (6шт.)		
		Переда-вальне число	1,0		
	Електродвигун	Тип	4А280S4		
		Потуж-ність, кВт	110		
		Частота обертання, $хв^{-1}$	1500		
		Рід току	змінний		
		Напруга, В	380		
Пристрій заванта-жувальний	Призначення		Регулювання подачі матеріалу до валків без використання підпресовника		
	Тип/кількість, шт.		Заслінка-шибер/2		

	Механізм регулювання	Гвинтовий
	Хід заслінки, мм	200
Пристрій регулю-вання валків	Призначення	Осьове суміщення формуючих елементів та зубчастих коліс синхронізуючої зубчастої передачі
	Механізм регулювання	Ричажно-гвинтовий
Пристрій захисту пресу від перевантажень	Тиск масла в гідроциліндрах номінальний, кгс/см^2 (МПа)	238 (23,8)
	Насос ручний, тип	НКРАМ 014 1200
	Пневмогідроакумулятор	AS3P360CG1
	Робоча рідина	ИГП-30, ТУ 38.101413-97, ISO VG ISO 6743 (DIN 51524.2)
	Об’єм масла гідросистемі, л	~25
	Газ зарядки пневмогідро-акумулятора	Азот технічний II сорту, ГОСТ 9293-74
	Тиск зарядки, кгс/см^2 (МПа)	100 (10)
	Род току та напруга живлення гидро-електроапара-тури,	Постійний, 24В

Загальний вигляд преса ПБВ20БМ-2-360 показаний на рис. 7.23-7.25. Прес представляє собою конструкцію безстанінного типу, всі основні вузли якого змонтовані на рамі 1.

Прес має два робочих валка – приводний 3 и ведений 4, змонтовані на опорі валків 2, яка кріпиться до рами 1 за допомогою болтових з’єднань. Валки оснащені змінними кільцевими бандажами із зубчасто-желобчастими формуючими елементами, виконаними на їх робочих поверхнях.

Підшипникові опори 6 (подушки нерухомі) приводного валка 3 встановлені на опорі валків 2 та кріпляться до неї бовтами.

Підшипникові опори 7 (подушки рухомі) веденого валка 4 з’єднані з опорою валків 4 шарнірно за допомогою пальців 9.

Таблиця 7.6 – Технічні характеристики валкового преса ПБВ20БМ-2-202-П

Призначення			Виробництво брикетів з дрібнофракційних матеріалів (фр. ~0…5 мм)	
Продуктивність, т/год			до 30	
Зусилля пресування номінальне, кН			2400	
Момент пресування номінальний, кНм			100	
Характеристики валкового блоку	Діаметр бандажів середній, мм		648	
	Ширина робочої поверхні бандажів, мм		202	
	Кількість пар бандажів, шт.		2	
	Частота обертання валків, $хв^{-1}$		9,8	
	Тип формуючих елементів / Кількість формуючих елементів загальна		R17/ 520	R14/756
Характеристики брикетів	Форма		«пельменеподібна»	
	Типорозмір		R17	R14
	Розмір, мм		40×39×19	32×30×15
	Об’єм, $см^3$		~19…21	~10…12
Привод	Редуктор	Тип	Ц3Н-630-125-12	
		Переда-точне число	125	
		Крутний момент, кН×м	90	
	Модуль/ передавальне число проміжної зубчастої передачі		18/1,2	
	Модуль/ передавальне число синхронізуючої зубчастої передачі		18/1,0	
	Відкрита клиноремінна передача	Ремінь (кільк. шт.)	SPC-2500Ш (6шт.)	
		Передавальне число	1,0	
	Електродвигун	Тип	4A280S4	
		Потужність, кВт	110	
		Частота обертання, $хв^{-1}$	1500	
		Рід току	змінний	
		Напруга, В	380	
Пристрій завантажувальний	Призначення		Регулювання подачі матеріалу до валків без використання підпресовника	
	Тип/кількість, шт.		Заслінка-шибер/2	
	Механізм регулювання		Гвинтовий	
	Хід заслінки, мм		200	
Підпресовник	Призначення		Примусова подача та попереднє ущільнення матеріалу який подається до міжвалкового простору	
	Тип/кількість, шт.		Шнековий з мотор-редуктором 4МП-63-112-900-213(320)-Ц-У3/ 2	

	Потужність електродвигуна приводу, кВт/ рід току/ напруга , В	11/змінний/380
	Частота обертання шнеку, $хв^{-1}$	112
	Крутний момент на шнека, Н×м	900
Пристрій регулювання валків	Призначення	Осьове суміщення формуючих елементів та зубчастих коліс синхронізуючої зубчастої передачі
	Механізм регулювання	Ричажно-гвинтовий
Пристрій захисту пресу від перевантажень	Тиск масла в гідроциліндрах номінальний, $кгс/см^2$ (МПа)	238 (23,8)
	Насос ручний, тип	НКРАМ 014 1200
	Пневмогідроакумулятор	AS3P360CG1
	Робоча рідина	ИГП-30, ТУ 38.101413-97, ISO VG ISO 6743 (DIN 51524.2)
	Об’єм масла гідросистемі, л	~25
	Газ зарядки пневмогідроакуму-лятору	Азот технічний II сорту, ГОСТ 9293-74
	Тиск зарядки, $кгс/см^2$ (МПа)	100 (10)
	Род току та напруга живлення гидро-електроапаратури,	Постійний, 24 В

Рухома і нерухома подушки з'єднані попарно за допомогою захисних пристроїв – гідродемпферів 9, вісі 10, сухаря 11 та регулювальних гайок 12,13. Тиск робочої рідини в гідродемпферах 9 забезпечує врівноваження зусилля пресування, відповідне заданому максимально допустимому розпірному зусиллю – 2500…3000 кН. Управління роботою гідродемпферів 9 здійснюється за допомогою гідросистеми. Крутний момент на робочі валки 3 та 4 з лінії приводу пресу передається за допомогою проміжного валка 5, змонтованого на опорі валків 2 за допомогою підшипникових опор проміжного валу 8, закріплених до опори 2 бовтовими з’єднаннями. Привод пресу складається із зубчастої муфти 17, триступінчастого редуктора 18, клиноремінної передачі 19 та асинхронного електродвигуна 20.

Загальний вигляд преса ПБВ20БМ-2-202-П показаний на рис. 7.26-7.27. За складом основних деталей та вузлів він ідентичний пресу ПБВ20БМ-2-360. Відмінною особливістю його конструкції є наявність підпресовників 22 шнекового типу, які монтуються на прес за допомогою спеціальної рами 21, яка з використанням болтових з'єднань кріпиться до опори валків 2.

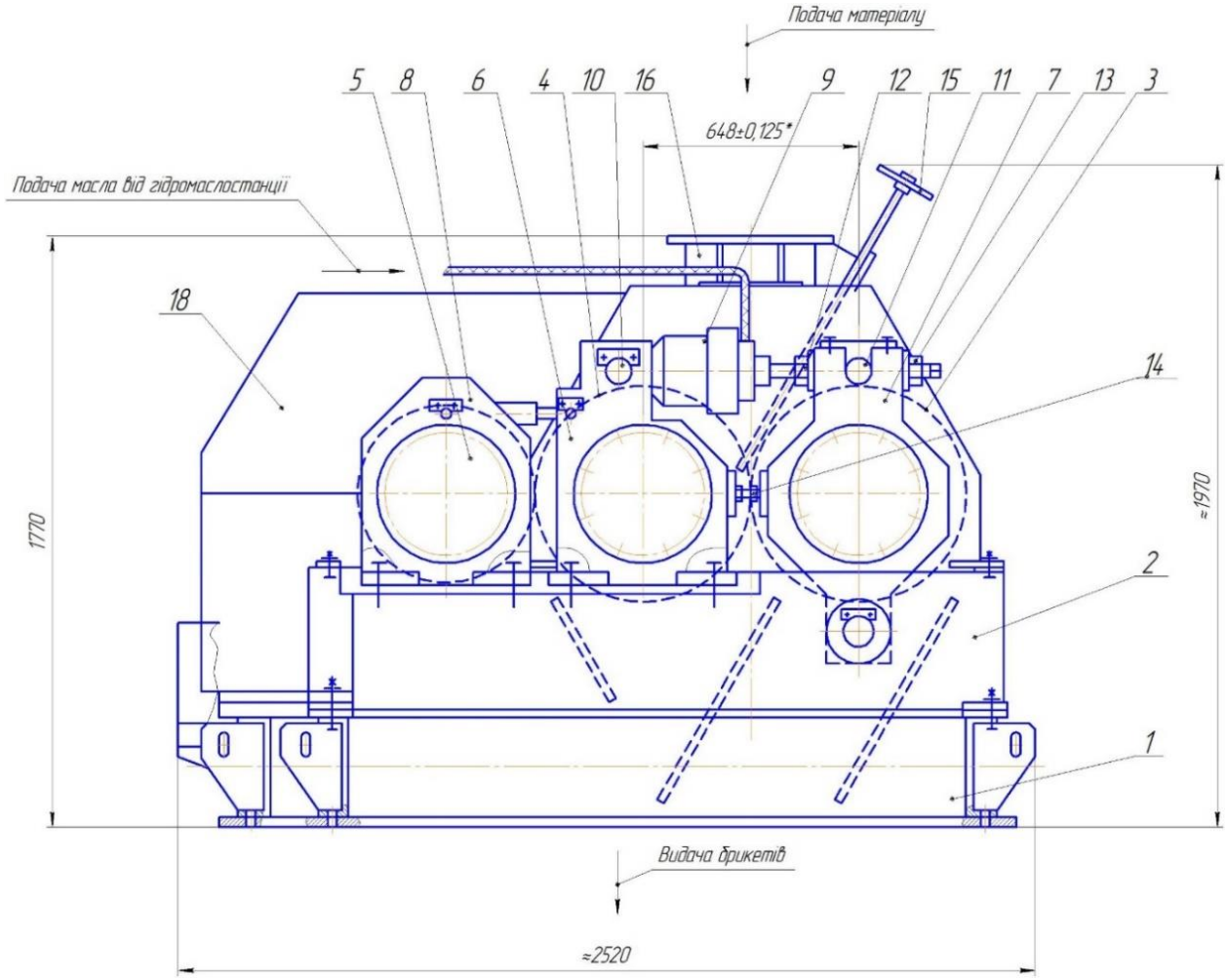


Рисунок 7.23 – Валковий прес ПБВ20БМ-2-360 (вигляд спереду)

1 – рама; 2 – опора валків; 3 – валок ведений; 4 – валок приводний; 5 – валок приводний проміжний; 6 – підшипникова опора приводного валка (подушка нерухома); 7 – підшипникова опора веденого валка (подушка рухома); 8 – підшипникова опора проміжного приводного валка; 9 – гідроциліндр (демпфер) захисного пристрою преса; 10, 11 – пальці кріплення гідроциліндру; 12, 13 – гайки регулювальні; 15 – механізм регулювання подачі шихти; 16 – завантажувальний пристрій

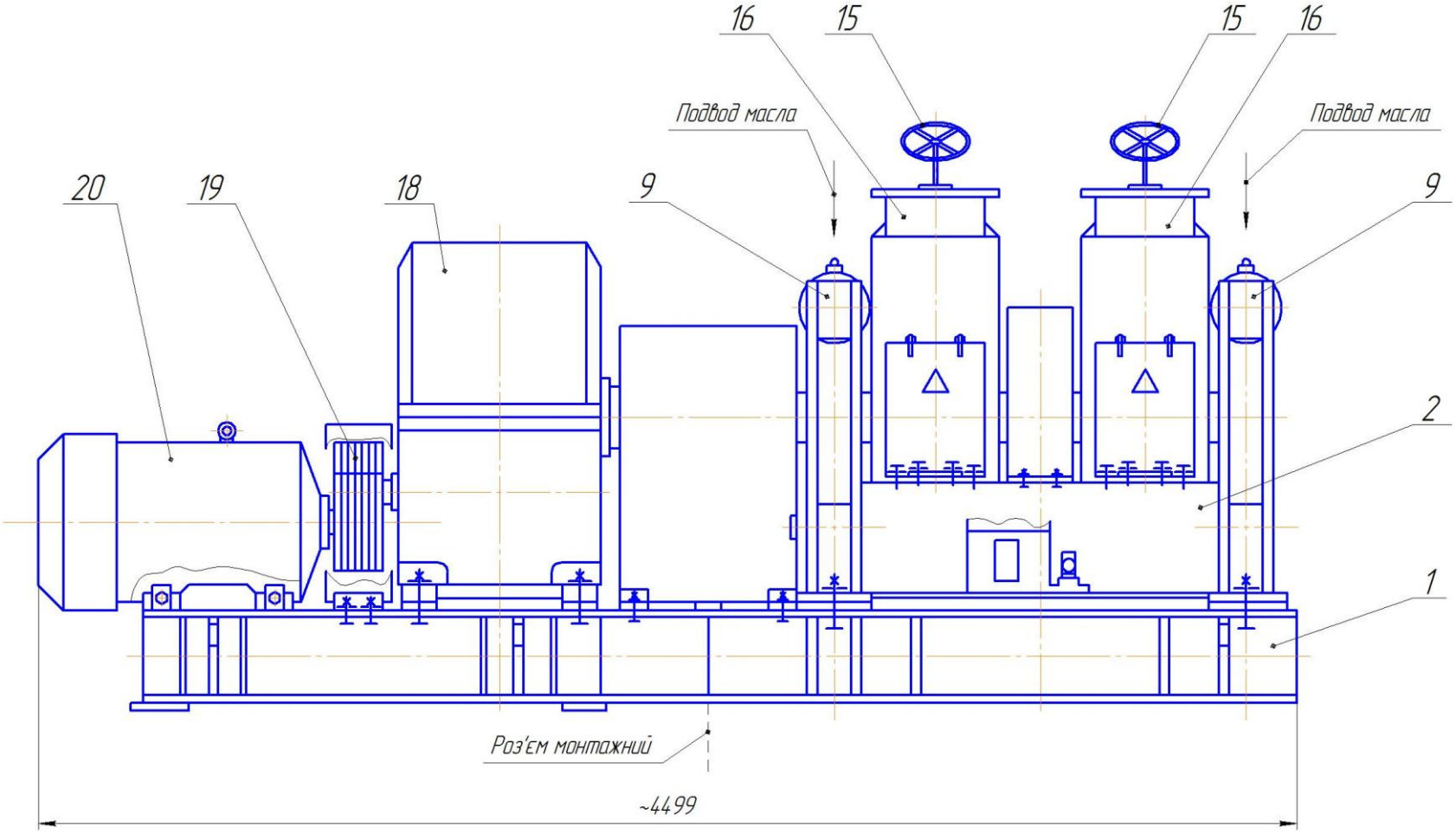


Рисунок 7.24 – Валковий прес ПБВ20БМ-2-360 (вигляд зліва)

1 – рама; 2 – опора валків; 9 – гідроциліндр (демпфер) захисного пристрою преса; 15 – механізм регулювання подачі шихти; 16 – завантажувальний пристрій; 17 – муфта зубчаста; 18 – редуктор; 19 – клиноремінна передача; 20 – електродвигун

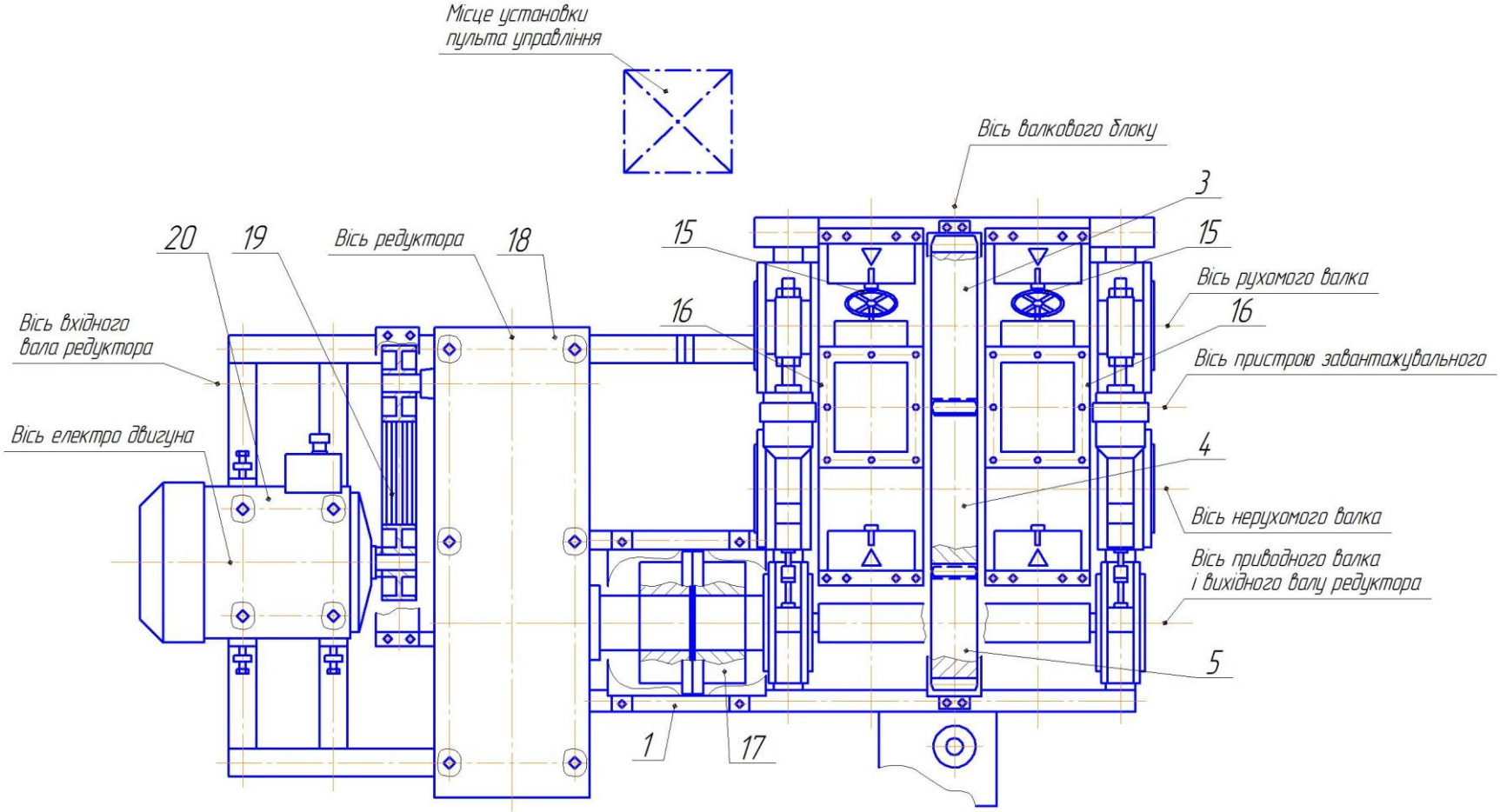


Рисунок 7.25 – Валковий прес ПБВ20БМ-2-360 (вигляд зверху)

1 – рама; 3 – валок ведений; 4 – валок приводний; 5 – валок приводний проміжний; 15 – механізм регулювання подачі шихти; 16 – завантажувальний пристрій; 17 – муфта зубчаста; 18 – редуктор; 19 – клиноремінна передача; 20 – електродвигун

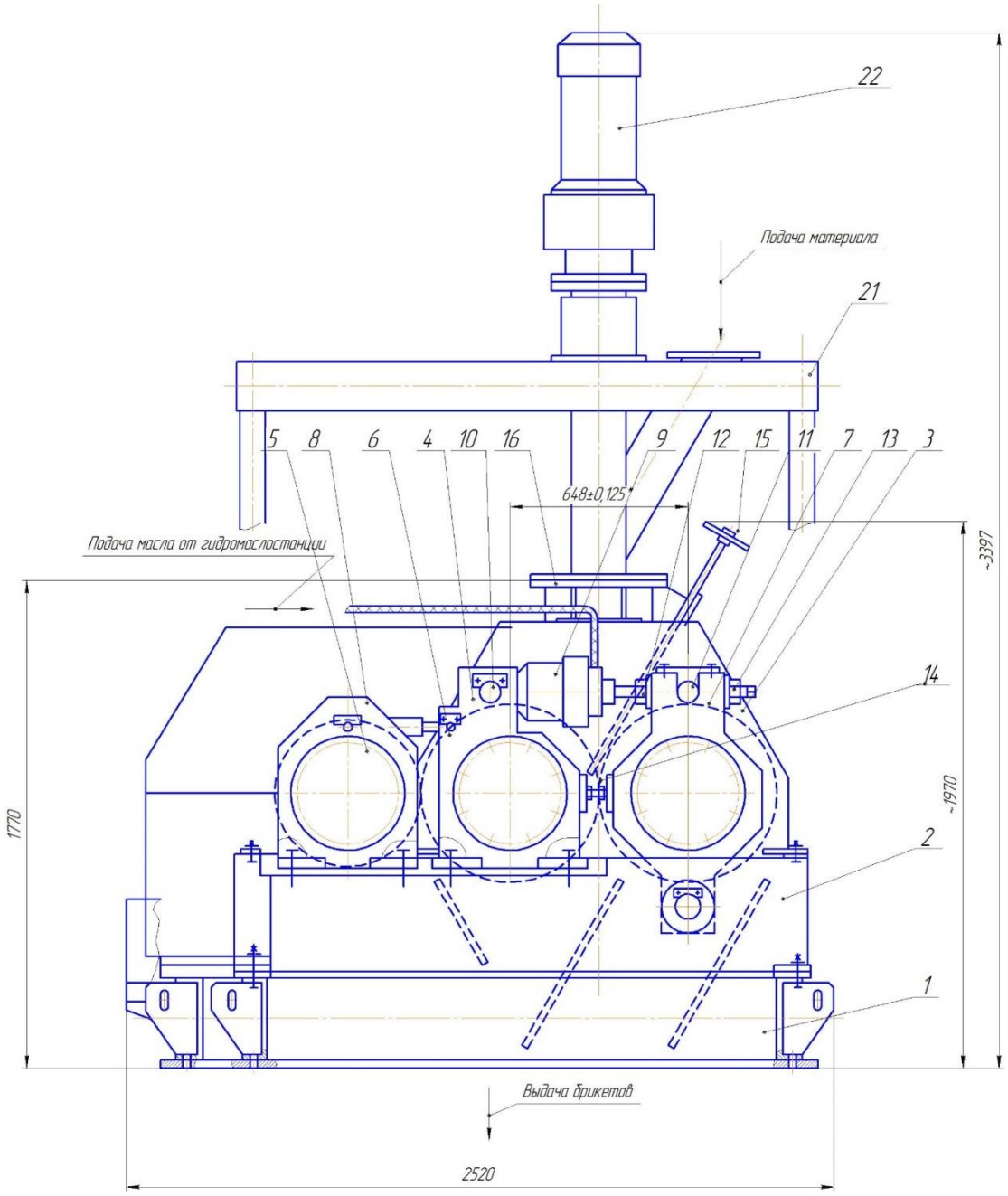


Рисунок 7.26 – Валковий прес ПБВ20БМ-2-202-П (вигляд спереду)

1 – рама; 2 – опора валків; 3 – валок ведений; 4 – валок приводний; 5 – валок приводний проміжний; 6 – підшипникова опора приводного валка (подушка нерухома); 7 – підшипникова опора веденого валка (подушка рухома); 8 – підшипникова опора проміжного приводного валка; 9 – гідроциліндр (демпфер) захисного пристрою преса; 10, 11 – пальці кріплення гідроциліндру;

12, 13 – гайки регулювальні; 15 – механізм регулювання подачі шихти; 16 – завантажувальний пристрій; 21 – рама підпресовників; 22 – підпресовник

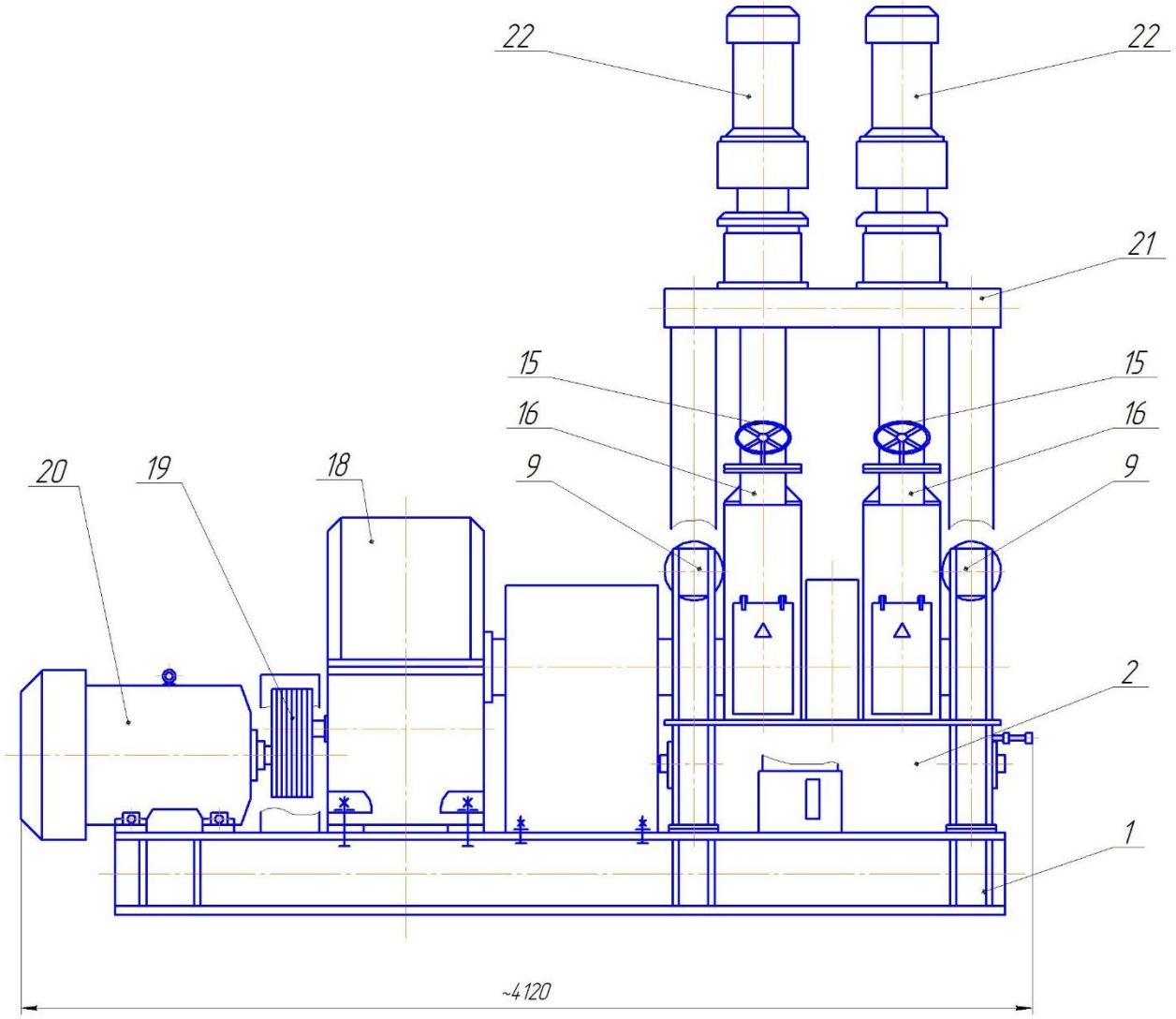


Рисунок 7.27 – Валковий прес ПБВ20БМ-2-202-П (вигляд зліва)

1 – рама; 2 – опора валків; 9 – гідроциліндр (демпфер) захисного пристрою преса; 15 – механізм регулювання подачі шихти; 16 – завантажувальний пристрій; 17 – муфта зубчаста; 18 – редуктор; 19 – клиноремінна передача; 20 – електродвигун; 21 – рама підпресовників; 22 – підпресовник

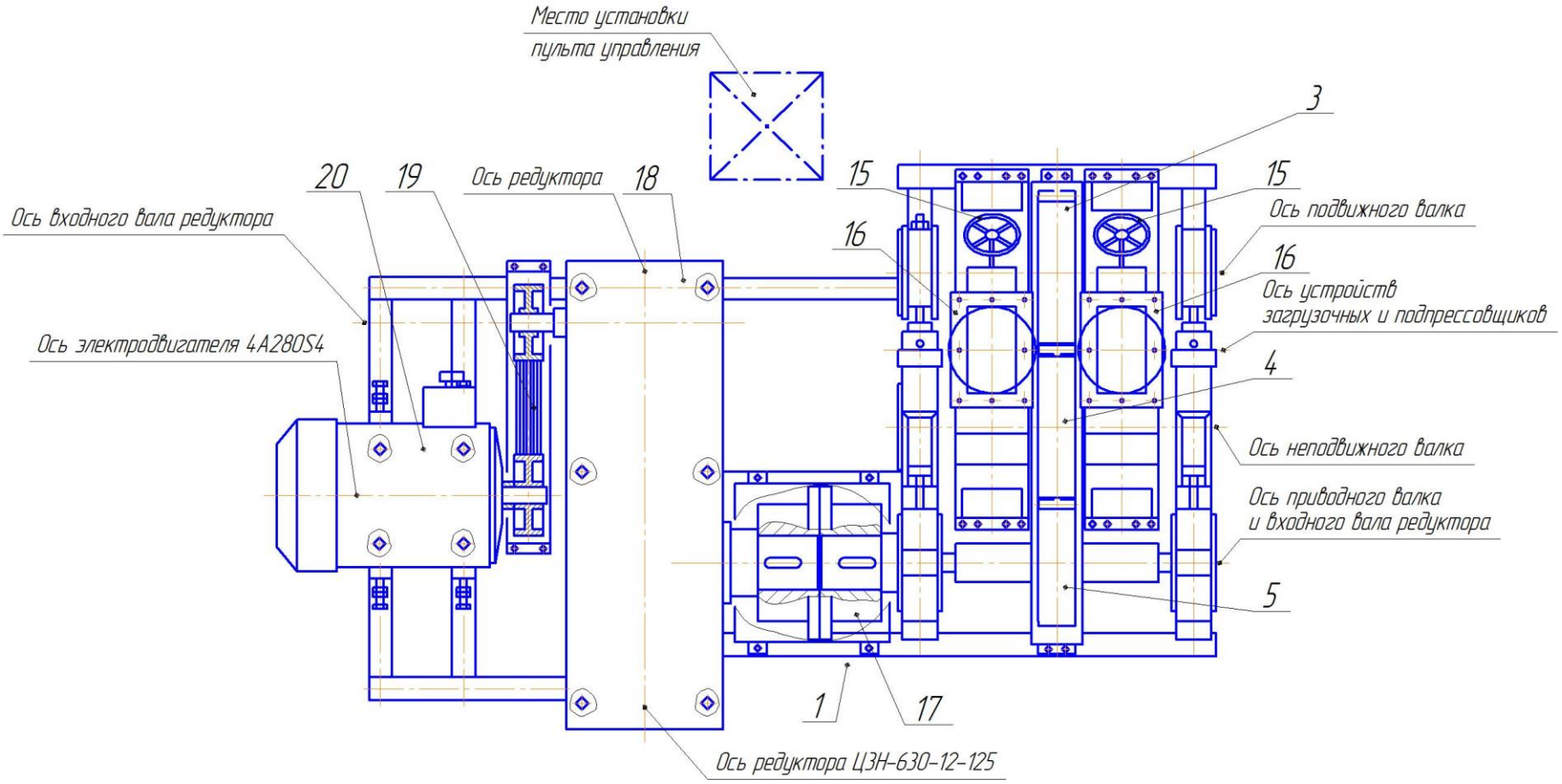


Рисунок 7.28 – Валковий прес ПБВ20БМ-2-202-П (вигляд зверху)

1 – рама; 3 – валок ведений; 4 – валок приводний; 5 – валок приводний проміжний; 15 – механізм регулювання подачі шихти; 16 – завантажувальний пристрій; 17 – муфта зубчаста; 18 – редуктор; 19 – клиноремінна передача; 20 – електродвигун

На базі розробок деталей та вузлів валкового преса, представленого в роботі, створена та виготовлена модернізована модель валкового преса ПБВ-648/360-200П-19 [213]. Даний прес розроблений за модульним типом з використанням уніфікованих деталей та вузлів, які застосовуються в різних модифікаціях валкових пресів конструкції ІЧМ. Загальний вигляд даної машини представлений на рис. 7.29



Рисунок 7.29 – Валковый пресс ПБВ-648/360-200П-19

На рис. 7.30 наведено загальну декомпозицію даного валкового преса, яка дає змогу наочно представити базові конструктивні елементи (модулі), з яких складається дана машина.

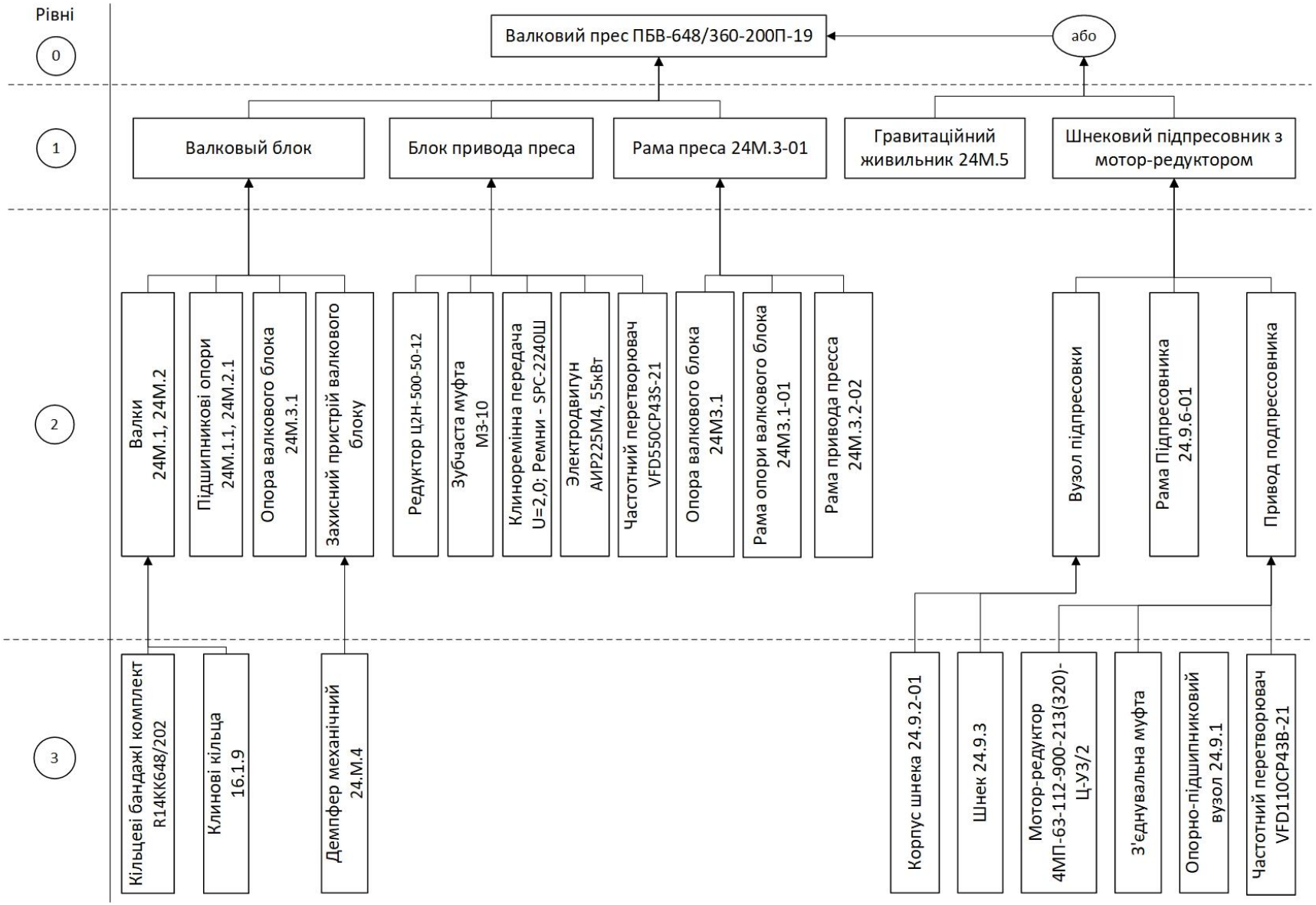


Рисунок 7.30 – Загальна декомпозиція преса ПБВ-648/360-200П-19

У табл. 7.7 наведено основні технічні характеристики модернізованого преса 24М.

Застосування такого преса дозволяє виробляти брикети з наступних видів матеріалів і їх сумішей: торф, буре вугілля, гідролізний лігнін, вугільного штибу і шлами, технічний вуглець і т.п. Також можлива добавка до основної шихтовці певної кількості подрібненої сировини рослинного походження.

Даний прес є базовою модифікацією валкових пресів, оснащених підпресовником, призначеної для брикетування легких дрібнофракційних матеріалів (насипна щільність ρ_{bulk}≈0,2…0,6 г/см^3).

Робота преса, в залежності від конкретних технологічних умов, може вестися з використанням підпресовника. При необхідності можливий його швидкий демонтаж і робота в умовах гравітаційної подачі шихти (як правило при ρ_{bulk}≥0,6 г/см^3) з використанням спеціального пристрою, яким регулюється об’єм матеріалу, що подається в міжвалковий простір.

У складі лінії приводу преса і подпрессовщіка передбачено використання перетворювачів частоти Delta Electronics – VFD900CP43A-21 (прес), VFD185C43A (підпрессовник) [214]. Це обумовлено такими міркуваннями.

В реальних виробничих умовах, при зміні фракційного і компонентного складу шихт, для отримання якісних брикетів і забезпечення роботи преса в межах його технічних характеристик потрібне узгодження потоків матеріалу, що брикетується, шляхом управління частотою обертання шнека підпресовника і валків преса.

Для ряду шихт існує обмеження по швидкості деформації, при якій можливе отримання якісних брикетів. Тому використання запропонованих частотних перетворювачів дозволяє з одного боку регулювати швидкість деформації шихти, з іншого – забезпечити необхідний силовий вплив на ущільнюваний матеріал з боку шнека і валків преса.

Таблиця 7.7 - 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	Механічне
Продуктивність, т/ч	≈3…17,5*
Максимальний момент пресування, кН×м	71
Діаметр валків, мм	648
Ширина валків, мм	360
Номінальна частота обертання валків, мин$^{-1}$	7
Потужність електродвигуна привода преса, 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, мин$^{-1}$	90
Потужність приводу підпресовника, кВт	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

Надалі на базі даної машини будуть розроблені її модифіковані версії, в яких передбачається використання:

- гідравлічного пристрою для запобігання валків преса від перевантажень;
- оснащення, з урахуванням умов експлуатації, електродвигунами у вибухозахищеному або загальнопромисловому виконанні;
- оснащення преса додатковими комплектами бандажів з різними формуючими елементами на пресуючих поверхнях і змінними шнеками підпресовника з різним кроком витків, розроблених під конкретні групи матеріалів, що брикетуються і т.п.

Проведено порівняння розробленої конструкції преса з близькими за технічними характеристиками і призначенням валковими пресами інших виробників:

- DH 400 (K.R. Komarek Inc., США);
- MS200 (Bepex, США);
- GY750-220 (Luoyang Zhongyuan Mining Machine Manufacture Co., Ltd., Китай).

Також, для порівняння обраний кривошипно-шатунний штемпельний прес Б9032, який є поширеною і типовою машиною для виробництва паливних брикетів з торфу і подібних йому волокнистих матеріалів з насипною щільністю від 0,2 до 0,6 г/см^3.

Крім аналізу основних технічних характеристик, для оцінки ефективності конструкції преса, використанні параметри оцінки ефективності – питоме зусилля пресування P_u, питома енергоємність E_u; питома металоємність G_u:

$$P_u = \frac{P_{\max}}{L_V};\ E_u = \frac{N}{Q};\ G_u = \frac{m}{Q}. \qquad (7.1)$$

де P_{max} – максимальне зусилля пресування (технологічне навантаження), кН;

L_V – ширина валків (пресуючої поверхні), см;

N – потужність, що споживається пресом, кВт;

Q – продуктивність преса, т/ч;

m – маса преса, т;

Технічні характеристики і показники ефективності аналізованих пресів наведені в табл. 7.8.

Порівняльний аналіз даних табл. 7.8 показує наступне:

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).

Таблиця 7.8 - Порівняння основних характеристик преса нової конструкції з пресами інших розробників

Тип преса	Валковий				Штемпельний
Модель преса	ПБВ-648/360-200П-19	DH 400	MS200	GY750-200	Б9032
Діаметр валків, мм	648	521	711	650	-
Ширина валків, мм	360	102…508	550	205	-
Максимальне зусилля пресування, кН	2000	1780	2000	2200	1600
Потужність, кВт	90,0	97,0	160,0	90,0	168,2
Продуктивність, т/час	3,0…17,5	4,5…18,0	10,0	4,0…6,5	4,0
Маса преса, кг	12000	14500	12000	19200	56000
Питоме зусилля пресування *Pu*, кН/см	55,0	26,0…130,0	36,4	107,0	44,0 (≈63,0*)
Питома енергоємність *Eu*, кВт×час/т	5,14…30,0	5,4…21,6	16,0	13,9…22,5	42,1
Удельная металлоемкость *Gu*, т/(т×час)	0,68…4,0	0,8…3,2	1,2	3,0…4,8	14,0

2. Співвідношення маси преса і його продуктивності показує, що в порівнянні з аналогічними валковими машинами він має хороші показники, а в 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 для впровадження розробкою при створенні та впровадженні технологій та обладнання для виробництва брикетованого

композитного твердого палива на базі вторинних техногенних енергетично цінних дрібнофракційних матеріалів. На даний прес розроблена технічна документація, яка прийнята до подальшого впровадження при виробництві валкових пресів ДП «Експериментально-дослідне підприємство Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України».

На базі розробок наведених в дисертаційній роботі виконано декілька впроваджень валкових пресів та їх деталей та вузлів:

- На підприємстві ТОВ «Промбрикет» (м. Дніпро) впроваджено шнековий підпресовник до валкового преса для брикетування широкої гами металургійних та паливних матеріалів, що дозволило підприємству підвисити якість продукції та знизити об’єм використання сполучних речовин при виробництві брикетів.
- На підприємстві ТОВ «Пя’тихатський завод металургійних сумішей» (м. Пя’тихатки) впроваджено вдосконалену конструкцію змінних кільцевих бандажів з новим типом формуючих елементів, які дозволили підвисити якість брикетів, що виробляються з металургійного карбіду кремнію та інших сировинних матеріалів, а також підвисити стійкість бандажів та спростити процедуру їх відновлення шляхом наплавки.
- ТОВ «Біогумос» (м. Львів) впроваджені рекомендації за якими внесено зміни в конструкцію приводу валкового преса та шнекового підпресовника, що дозволило суттєво підвищити якість торф’яних брикетів, що виробляються на підприємстві та надалі використовуються в енергетичній промисловості.
- ДП «Експериментально-дослідне підприємство Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України» спільно з підприхмствами партнерами та з використанням розробок створених в дисертаційні роботі створили декілька промислових валкових пресів, які впроваджені на промислових підприємствах, наприклад, одними яких є ТОВ НВП «Квадрат» (Харківська обл.), ТОВ «Нано Ойл Україна» (м. Запоріжжя) та ін.

Висновки

1. Запропоновані наступні конструктивні рішення валкових пресів вдосконаленої конструкції:
   - рама преса, що компонується за модульним принципом;
   - вдосконалена конструкція валків з використанням швидкоз'ємних затискних елементів;
   - система захисту валків від перевантаження;
   - підпресовник шнекового типу.
2. 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 високих значень коефіцієнта ущільнення (≥3). Розроблені модифікації валкових пресів призначені для брикетування дрібнофракційних матеріалів, переважно, фракцій 0...5 мм.
3. З використанням запропонованого в роботі комплексного методу вибору раціональних конструктивних рішень розроблена вдосконалена модель валкового преса, 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.

Створені в роботі конструктивні рішення деталей та вузлів валкових валкових пресів впроваджені на ряді підприємств, що підтверджено відповідними актами. Розроблена конструкторська документація на виготовлення вдосконаленої конструкції преса та передана до ДП «Експериментально-виробниче підприємство ІЧМ».

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі наукових узагальнень, теоретичних розробок і промислових досліджень в дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема створення сучасного пресового обладнання для брикетування дрібнофракційних 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 брикетуємого матеріалу знизити негативний вплив пружної післядії на якість брикетів.

5. Теоретично досліджено взаємозв’язок між величиною ущільнення та тиском пресування з урахуванням швидкості деформації шихти у міжвалковому просторі та запропоновано рівняння, що описує даний зв'язок $p = K_n \cdot a \cdot K_y^b$, 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 деформації.
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 (0,5 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Носков В.А. Создание и внедрение прессового оборудования для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов: Дис... д-ра техн. наук: 05.05.08 / НАН Украины; Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова. Днепропетровск, 2001. 318л. Библиогр.: л. 288-304.
2. Маймур Б.Н. Совершенствование конструкции и улучшение эксплуатационных характеристик валковых брикетных прессов // Б.Н. Маймур, В.И. Петренко, А.Т. Лебедь / Бюл. научно-технической и экономической информации «Черная металлургия» – №12. – 2011. – С. 67-71.
3. Развитие разработок ИЧМ в области создания прессового оборудования для брикетирования мелкофракционных шихтовых материалов / В.А. Носков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. — Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2006. — Вип. 12. — С. 253-266. — Бібліогр.: 5 назв. — рос.
4. Научные разработки ИЧМ в области брикетирования мелкофракционных шихтовых материалов / В.А. Носков, Б.Н. Маймур // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. — Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2004. — Вип. 8. — С. 362-368. — Бібліогр.: 8 назв. — рос.
5. Баюл К.В. 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.
6. Баюл К.В. Загальна класифікація та системний підхід до розробки конструкцій валкових пресів. / [К.В. Баюл, І.Г. Муравйова, С.В. Ващенко, О.Ю. Худяков та ін.] // Метал і лиття України. 2021. – №2. – С.64-74.

7. Баюл К.В. Анализ современных машин для брикетирования мелкофракционных сырьевых материалов. / В.И. Большаков, К.В. Баюл // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №4. – С. 92-96.
8. Баюл К.В. 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.
9. Баюл К.В. 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.
10. Баюл К.В. 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 2013г. Днепропетровск (Украина). Ответственный редактор В. И. Большаков. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2013. – С.132-137.
11. Эйдельман Л.П. Состояние брикетирования в металлургии СССР. // Черная металлургия. Бюл. Института «Черметинформация». –1981. – №18. – С.8-12.
12. Эйдельман Л.П. Состояние брикетирования шихтовых материалов в зарубежной черной металлургии / Л.П. Эйдельман // Черная металлургия. Бюл. Научно-технической информации. –1982. – Вып. 1. – С.28-37.
13. Bembenek M.: Badania i perspektywy nowych obszaryw stosowania pras walcowych. Przemysł Chemiczny, t. 96 nr 9, 2017, 1845-1847. (In Polish).
14. Hryniewicz M., Janewicz A. Badania i rozwój konstrukcji prasy walcowej [Research and development of roll press construction]. Problemy Eksploatacji, 2008, no. 3, pp. 143- 151. (In Polish).

15. Hryniewicz, M., Kosturkiewicz, B., Janewicz, A., Selected problems of development of construction and exploitation of roll presses, Problemy Eksploatacji, Vol. 4, pp. 63-70, 2004.
16. Hryniewicz, M., Bembenek, M., Gara, P., Problem of roll press compacting unit selection to consolidate material in two-stage granulation process, Chemik: nauka – technika – rynek, Y. 61, Vol. 9, pp. 425-428, 2008.
17. Wennerstrum S. Ten things you need to consider whenchoosing and installing a roller press system. Powder and bulk engineering, 2000, February, pp. 37-47.
18. Computer aided design of roll type briquetters and compactors by Roman T. Dec, Ph.D., and Richard K. Komarek. (IBA Proceedings, Vol. 21, November, 1989, 21st. Biennial Conference, New Orleans, LA, pp. 35-38).
19. Roll press design for powder and bulk solids by Roman T. Dec, Ph. D. and Richard K. Komarek. (15th Powder and Bulk Solids Conference/Exhibition, Proceedings of the Technical Program, June, 4-7, 1990, O'Hare Exposition Center, Rosemont, IL, pp. 125-136).
20. Dec R.T., Zavaliangos A., Cunningham J.C., Comparison of various modeling methods for analysis of powder compaction in roller press. Powder Technology, 2003, vol. 130, no. 1-3, pp.265–271. http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00203-6.
21. Равич, Б.М. Брикетирование в цветной и черной металлургии / Б.М. Равич. – М.: Металлургия, 1975. – 232 с.
22. Маймур Б.Н. 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.
23. Barnett T. Roll-press briquetting: Compacting fines to reduce waste-handling costs. Powder and bulk engineering, 2010, vol. 24, no. 10, pp. 1-6. http://www.powderbulk.com/wp-content/uploads/pdf/pbe_201010_058.pdf.
24. Баюл К.В. 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.

25. B220B Briquetting and Compacting Roll Press. https://komarek.com/briquetting-machine/b220b-briquetting-machine/
26. B400B Briquetting and Compacting Roll Press. https://komarek.com/briquetting-machine/b400b-briquetting-machine/
27. BH400CH Briquetting and Compacting Roll Press. https://komarek.com/briquetting-machine/bh400ch-briquetting-machine/
28. Носков В.А. Устройство для предохранения от перегрузок и настройки заданного усилия брикетирования в валковом прессе / В.А. Носков, В.И. Большаков // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2000. – Вип. 5. – С. 91-97.
29. Муравьева, Ирина Геннадиевна. Комплексное исследование и разработка рациональной системы гидроприжима валкового брикетного пресса: диссертация ... кандидата технических наук: 05.04.04. – Днепропетровск, 1991. – 170 с.
30. Баюл К.В. 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.
31. http://komarek.com/
32. http://hosokawa.ru/bepex/equipment/
33. BEPEX – Валковые прессы серии L http://www.composyst.ru/bepex/?pg=P01
34. BEPEX – Валковые прессы серии K http://www.composyst.ru/bepex/?pg=P02
35. BEPEX – Валковые прессы серии MS http://www.composyst.ru/bepex/?pg=P03
36. Köppern Roller Presses http://www.koeppern-international.com/products/roller-presses/

37. http://www.sahutconreur.com/documentations.html
38. http://spidermash.ru/press/
39. Briquetting press http://www.bestbriquettepress.com/briquetting-press/
40. http://www.zymining.com/
41. http://www.briquettepress.com/
42. United States Patent 4,337,023, Int.Cl. B29C 3/02; B29C 15/00. Roller press for compacting and briquetting of bulk material / Heins Koppern, Hans-Georg Bergendahl, Hartmut Rieschel, Friedhelm Coch; Assignee: Maschinenfabrik Koppern GmbH & Co. KG. – Appl. No.: 261,700; Filed: May 8, 1981; Jun. 29, 1982.
43. United States Patent 4,097,215, Int.Cl. B29C 1/00; B29C 3/02. Segmented briquetting roll / Karl R. Komarek; Assignee: K. R. Komarek, Inc. – Appl. No. 796,223; Filed: May 12, 1977; Jun. 27, 1978.
44. United States Patent 3,907,486, Int.Cl. B29C 3/02. Means for internally cooling briquetting machine rolls and segment / Frank Kennedy; Assignee: United States Steel Corporation. – Appl. No. 516,557; Filed: Oct 21, 1974; Sept. 23, 1975.
45. А. с. 1328229 СССР, МКИ3 В 30 В 11/16. Пресс для брикетирования сыпучих материалов [Текст] / В.Ф. Тарасенко, В.А. Носков, Л.А. Тубольцева (СССР). – № 4072049/22–27 ; заявл. 27.03.86 ; опубл. 07.08.87.
46. United States Patent 4,337,023, Int.Cl. B29C 3/02; B29C 15/00. Roller press for compacting and briquetting of bulk material / Heins Koppern, Hans-Georg Bergendahl, Hartmut Rieschel, Friedhelm Coch; Assignee: Maschinenfabrik Koppern GmbH & Co. KG. – Appl. No.: 261,700; Filed: May 8, 1981; Jun. 29, 1982.
47. Равич Б.М. Брикетирование руд. М.: Недра. – 1982. – 183с.
48. Артюх В. Г. Применение предварительно напряженных пар в качестве предохранителей металлургических машин / В.Г. Артюх // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 1997 - Вып.2. – С.69-89.

49. Носков В.А. Устройство для затяжки пружин предохранительных устройств валкового брикетного пресса / [В.А. Носков, А.Т. Лебедь, В.И. Петренко, Б.Н. Маймур] // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2006. – Вип. 9. – С. 83-86.
50. Крячко А.П. Современные методы экономии энергетических ресурсов путем создания систем управления энергохозяйством на базе преобразователей частоты / А.П. Крячко, П.А. Новицкий // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – №6. – С.92– 94.
51. Компоненты систем электроснабжения и автоматизации в промышленности: общий каталог: ООО «СВ АЛЬТЕРА» – Киев. – 156с.
52. https://ru3a.mitsubishielectric.com/fa/ru
53. Гребеник В.М. Повышение надежности металлургического оборудования. Спрвочник / В.М. Гребеник, А.В. Гордиенко, В.К. Цапко // М.: Металлургия, –1988, – с.688.
54. Дипломное и курсовое проектирование механического оборудования и технологических комплексов предприятий строительных материалов, изделий и конструкций [Текст]: учеб. пособие для вузов / В. С. Богданов [и др.]; под ред. В.С. Богданова, А.С. Ильина. - М.: Изд-во АСВ, 2006. – 783 с.: ил., табл. - Библиогр.: с. 774-778 (105 назв.). – Предм. указ.: с. 779-780.
55. Кох П.И. Производство, монтаж, эксплуатация и ремонт подъемно-транспортных машин [Текст]: учеб. пос. / П.И. Кох. – К. – Донецк: Вища шк., 1977. – 352 с.
56. Баюл К.В. 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.
57. Johanson J.R., A rolling theory for granular solids, J. Appl. Mech., 1965, 842-848.

58. Johanson, J.R., Factors Influencing the Design of Roll-Type Briquetting Presses. Proceedings of the 9th Biennial Conference, The International Briquetting Association, 1965(b), September, pp. 17 – 31.
59. Johanson, J.R., Predicting limiting roll speeds for briquetting presses. Proceedings of the 13th Biennial Conference, The International Briquetting Association, 1973, pp. 89 – 99.
60. Johanson, J.R., Use of Theory for Design and Selection of Roll Presses for Agglomeration and Compaction. Proceedings of the 2nd International Symposium on Agglomeration, K.V.S. Sastry, Editor, Atlanta, GA, March 6-10, 1977, pp. 678-694.
61. Виноградов Г.А., Каташинский В.П. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул. М.: Металлургия, 1979. – 224 с.
62. Katashinskii V.P. and Shtern, M.B., Stress-Strained State of Powder Being Rolled in theDensification Zone. I. Mathematical Model of Rolling in the Densification Zone. Poroshkovaya Metallurgiya, 1983 (a), 11(251), pp. 17-21. https://link.springer.com/article/10.1007/BF00805540?LI=true
63. Katashinskii V.P. and Shtern, M.B., Stress-Strained State of Powder Being Rolled in the Densification Zone. II Distribution of Density, Longitudinal Strain and Contact Stress in the Densification Zone. Poroshkovaya Metallurgiya, 1983 (b), 12 (252), pp. 9-13. https://link.springer.com/article/10.1007/BF00802421
64. Cunningham J.C., Winstead D., Zavaliangos A., Understanding variation in roller compaction through finite element-based process modeling, Computers and Chemical Engineering 34 (7) (2010) 1058–1071. http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.04.008
65. Логинов Ю. Н., Буркин С. П., Бабайвалов Н. А., Полянский Л. И. Механика валкового брикетирования сыпучих материалов. Екатеринбург : Изд-во АМБ, 2010. – 304 с. http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00203-6.
66. Dec, R., Zavaliangos, A., Cunningham, J., Recent developments in FEM modeling of powder processing in the roller press, Proceedings of Biennial

Conference – Institute of Briquetting and Agglomeration, Vol.29, pp. 83-92. Clearwater Beach 2005.

67. Recent developments in FEM modeling of powder processing in the roller press by Dr. Roman T. Dec, Prof. Antonios Zavaliangos and Dr. John Cunningham. (29th Biennial Conference of the Institute for Briquetting and Agglomeration, Clearwater, FL, Proceedings, Vol.29, October 16-19, 2005, pp.83-92) Analysis of powder processing in the roller press using finite element modeling by Prof. Antonios Zavaliangos, Dr. Roman T. Dec, Richard K. Komarek. (XXII International Mineral Processing Congress, Cape Town, South Africa, September 28- October 3, 2003, Proceedings, Vol.1, pp. 298-306).
68. Powder processing in the roller press – theory and practice by Dr. Roman T. Dec, Prof. Antonios Zavaliangos. (Powder Handling & Processing, Vogel Transtech Publications 0934 71514, 1/2007, pp 23-28).
69. Reynolds G., Ingale R., Roberts R., Kothari S., Gururajan B. Practical application of roller compaction process modeling. Computers & Chemical Engineering, 2010, vol.34, no. 7, p.1049–1057. http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.03.004.
70. Guigon P., Simon O. Roll Press design – influence of force feed systems on compaction. *Powder Technology*, 2003, vol. 130, no. 1-3, pp. 41–48.
71. Гогаев К.А. Асимметричная прокатка металлических порошков I. Уплотняемость металлических порошков при асимметричной прокатке / К.А. Гогаев, Г.Я. Калуцкий, В.С. Воропаев // Порошковая металлургия. – 2009. – №3/4. – С. 36–42.
72. Гогаев К.А. Асимметричная прокатка металлических порошков II. Угловые параметры асимметричной прокатки / К.А. Гогаев, Г.Я. Калуцкий, В.С. Воропаев // Порошковая металлургия. – 2009 – №5/6 – С. 35 – 42.
73. Srikant, Pimple et al. Roller Compaction Design and Critical Parameters in Drug Formulation and Development: Review. International Journal of Pharm Tech Research, 2014-2015, vol.7, No.1, pp 90-98.

74. Bembenek M.: The issue of selection: shape and volume of briquettes agglomerated in a roller press. Journal of KONES: Powertrain and Transport, 2017, 24 (2), pp. 31–38.
75. Drzymała, Z., Industrial Briquetting – Fundamentals and Methods, Elsevier Science Publishers, Warszawa 1993.
76. Носков В.А. Исследование влияния конфигурации прессующего инструмента на показатели уплотнения мелкофракционных шихт в брикеты / В.А. Носков, К.В. Баюл // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – №4. – С. 137–138.
77. Bayul K. V. Effect of the geometrical parameters of roll press forming elements on the briquetting process: analytical study, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, July 2012, Volume 51, Issue 3-4, pp 157-164.
78. Носков В.А. Механизм формирования очага деформации при брикетировании мелкофракционных шихт в валковых прессах / В.А. Носков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1998. – №2. – С.137–139.
79. Носков В.А. Особенности захвата порошкообразной шихты валками при брикетировании / В.А. Носков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1997. – №4. – С.102–104.
80. Носков В.А. Оценка динамических нагрузок привода брикетного валкового пресса / В.А. Носков, В.И. Большаков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – №2. – С.88–90.
81. Кукушкин О.Н. Математическая модель очага деформации шихты в валковом брикетировочном прессе / О.Н. Кукушкин, В.И. Головко, И.Г. Муравьева, К.П. Лопатенко // Порошковая металлургия. – 1993. – №8. – С.24–30.
82. Носков В А. Аналитическое исследование распределения уплотнения брикета в формующих элементах валкового пресса / В.А. Носков, В.И. Петренко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 1. – С. 95–98.

83. Носков В.А. Научно-методические основы определения характеристик и режимов процесса брикетирования мелкофракционных материалов / [В.А. Носков, Б.Н. Маймур, В.И. Петренко и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 5. – К.: Наукова думка. – 2002. – С. 344-347.
84. Носков В.А. Исследование физико-механических свойств мелкофракционных промышленных отходов, определяющих их поведение при брикетировании / [В.А. Носков, Б.Н. Маймур, В.И. Петренко, А.Т. Лебедь] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1998. – С. 104–107.
85. Носков В.А. Влияние аэродинамических особенностей мелкофракционных шихт на процесс их уплотнения в валковых брикетных прессах / В.А. Носков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – № 5. – С.105–108.
86. Носков В.А. Экспериментальные исследования основных параметров и режимов брикетирования мелкофракционных техногенных отходов в валковых прессах / [В.А. Носков, Б.Н. Маймур, В.И. Петренко, А.Т. Лебедь] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – № 6. – С.104–107.
87. Разработка параметров формующих элементов валковых прессов для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов [Текст] [Рукопись]: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / К.В. Баюл; научн. рук. В.А. Носков; НМетАУ. – Днепропетровск, 2008. – 173 с. – Библиогр.: с. 158-172. – (в пер.) На правах рукописи.
88. Ващенко С.В. Розвиток наукових основ виробництва сировини для металургійної галузі методом брикетування: Автореферат дис. на здобуття наук. ступеня кандидата технічних наук: Спец. 05.16.02 - Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів / С.В.Ващенко. – Дніпропетровськ: ІЧМ НАНУ, 2014. – 25с.

89. Katashinskii V.P. Analytical determination of specific pressure during the rolling of metal powders, Poroshkovaya Metallurgiya (1996), pp.1-10.
90. Wang S.P., Choudhry S. and Werheimer T.B. Comparison between the static implicit and dynamic explicit methods for EFM simulation of sheet forming process. MARC Analysis Research Corporation, Palo Alto, CA., USA (1997).
91. Метод конечных элементов: Учебное пособие для ВУЗов. / Под ред. Варвака П. М. – Киев.: Вища школа, 1981. – 176 с.
92. Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method / O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor. Oxford; Auckland; Johannesburg; Melbourne; New Delhi: Butterworth-Heinemann (5th edition), 2000 – 1482 p.
93. Худяков А.Ю. Опытная верификация новых уравнений прессования мелкофракционных материалов горно-металлургического комплекса. Часть 1. Основное уравнение / Худяков А.Ю., Ващенко С.В., Баюл К.В., Семенов Ю.С. // Новые огнеупоры. – 2020. – С. 20-29.
94. Ващенко С.В. Разработка научно-методического подхода к выбору состава брикетируемой шихты и ее свойств / [С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков, К.В. Баюл, Ю.С. Семенов] // Сталь. – №8. – 2018. – С.2-6.
95. Vashchenko S.V. 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 (8) – p.509-512.
96. Ващенко С.В. 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 и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр. Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины. 2015. Вып. 30. С. 343–357.
97. Худяков О.Ю. Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності огрудкування агломераційних шихт / [О.Ю. Худяков, М.М. Бойко, Н.В. Полякова, В.І. Петренко та ін.] // Системні технології: регіон. міжвуз.

зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2016. – №5 (106). – С.62-72.

98. Піптюк В.П. Експериментальне дослідження підвищення технологічності брикетів феросиліцію для виробництва сталі / [В.П. Піптюк, Д.М. Тогобицька, К.В. Баюл, І.М. Логозинський та ін.] // Сучасні проблеми металургії. №21 Вип.1. – 2018. – С. 50-55.
99. Худяков А.Ю. Альтернативные способы грануляции тонкоизмельченных железорудных концентратов / [А.Ю. Худяков, М.Н. Бойко, К.В. Баюл, С.В. Ващенко] // Бюл. научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. – Вып. 1. – 2018. – С. 48-53.
100. Худяков А.Ю. Теоретические основы методики расчета и составления шихт с минимальной порозностью / [А.Ю. Худяков, С.В. Ващенко, М.Н. Бойко, К.В. Баюл и др.] // Бюл. научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. – Вып. 7. – 2018. – С. 23-32.
101. Худяков А.Ю. Оценка возможностей улучшения подготовки агломерационной шихты к спеканию / [А.Ю. Худяков, М.Н. Бойко, С.В. Ващенко, К.В. Баюл и др.]// 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.
102. Худяков А.Ю. Совершенствование подготовки мелкофракционных шихт к спеканию / [А.Ю. Худяков, М.Н. Бойко, Н.В. Полякова, С.В. Ващенко и др.] // Литво. Металургія. 2017: Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції (23-25 травня 2017 р., м. Запоріжжя). Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. – Запоріжжя, АА Тандем. – С.418-419.
103. Худяков А.Ю. Моделирование минимальной порозности шихты с помощью методов фрактальной геометрии и теории вероятностей / [А.Ю. Худяков, С.В. Ващенко, К.В. Баюл, Н.А. Солодкая и др.] // Материалы IV

международной научно-технической конференции КМОСС-2018, ГВУЗ УГХТУ, г. Днепр, Украина. – С. 125-126.

104. Ващенко С.В. Разработка научно-методического подхода к выбору состава брикетируемой шихты и ее свойств / [С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков, К.В. Баюл, Н.А. Солодкая и др.] // Материалы IV международной научно-технической конференции КМОСС-2018, ГВУЗ УГХТУ, г. Днепр, Украина. – С.50-51.
105. Ващенко С.В.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.
106. Khudyakov A.Yu. Kaolin Raw Material Briquetting for Lump Chamotte Production. Refractories and Industrial Ceramics / [A.Yu. Khudyakov, S.V. Vashchenko, K.V. Bayul et al.] // – 2018. – Vol. 59, p.333–337.
107. Баюл К.В. Формирование рекомендаций по разработке высокопроизводительного валкового пресса усовершенствованной конструкции / [К.В. Баюл, С.В. Ващенко, А.Ю. Худяков, Н.А. Солодкая и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 32. – Днепр. – 2018. – С. 402-414.
108. 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.
109. Хорошев А.Н. Введение в управление проектированием механических систем: Учебное пособие. - Белгород, 1999. - 372 с. - ISBN 5-217-00016-3.
110. Sharma P.C., Aggarwal D.K. Machine Design. S. K. Kataria & Sons, 2010. 1100p.
111. Bhandari, V. B. Design of Machine Elements. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2007. Print.

112. Budynas, Richard G, J. Keith Nisbett, and Joseph Edward Shigley. Shigley's Mechanical Engineering Design. 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2011. -1120p.
113. Golenko A. Fundamentals of machine design: a coursebook for Polish and foreign students. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2010. 175 p.
114. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов // М.: Машиностроение, 1977. – 526с.
115. Archard, J. F. Contacts and rubbing of flat surface. J. Appl. Phys., 1953, 24, 981.
116. Burwell J.T. On the Empirical Law of Adhesive Wear / J.T. Burwell, C.D. Strang // J.Appl. Phys. – 1952. – Vol. 23, № 1. – P. 18–28.
117. Kragelski, I. W.: Reibung und Verschleiß. VEB Verlag Technik, Berlin, 1971.
118. Польцер Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польцер, Ф. Майсснер [пер. с нем. О. Н. Озерского, В. Н. Пальянова] / Под ред. М. Н. Добычина — М.: Машиностроение, 1984. — 264 с.
119. Polzer G. Untersuchungen über Zusammenhängenzwischen Reibung und Verschleiß, insbesondere zwischen Reibkraft und Materialverlusterscheinungen. Dissertation B, Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt 1973.
120. Белый И. К. Исследование износа и технологических методов повышения надежности и долговечности вальцовых брикетных прессов. Кандидатская диссертация. Днепропетровск, ДГИ, 1968.
121. Белый И. К. Теоретические и экспериментальные исследования, разработка и внедрение высокоэффективных конструкций машин для брикетирования мелкозернистых материалов: Дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: Днепропетровск, 1973. – 351 с.
122. Shumacher, M.; Thisen, W.: HEXADUR® – Ein neuer Verschleißschtz für Hochdruck-Walzenmühlen, ZKG-International, 50 (1997) 10, pp. 529-539.
123. Баюл К.В. 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.

124. Testing the relative wear characteristics of different alloys for roller press forming elements by Dr. Roman T. Dec, Prof. Marek Hryniewicz, Richard K. Komarek (30th Biennial Conference of the Institute for Briquetting and Agglomeration, Savannah, GA, Proceedings, Vol.30, October 21-24, 2007, pp.130-139).
125. A. Hotter, W. Theisen, C. Broeckmann Quenching Simulation of PM Coated Tools / Transactions of materials and heat treatment proceedings of the 14-th IFHTSE congress. – Vol.25, No.5, October 2004. – pp. 752-757.
126. C. Broeckmann, A. Hotter, A. Packeisen Cladding of briquetting tools by hot isostatic pressing for wear resistance / International Journal of Powder Metallurgy, 2008, 44 (5) 49-56.
127. Носков В.А. Опыт освоения промышленного комплекса брикетирования отсевов ферросплавов на ОАО «НЗФ» / В.А. Носков, К.В. Баюл, В.А. Неведомский // XIII Международная научно-практическая конференция «Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов». Сборник научных статей. Том II. – Харьков 2005. – С.243–247.
128. Надежность и долговечность деталей машин / Под ред. Б. И. Костецкого. – Киев.: Техника, 1975. – 405с.
129. Некрасов З. И. К методике исследования процесса уплотнения порошков / [З. И. Некрасов, Б. Н. Маймур, В. В. Меркулов, В. С. Барабан] // Порошковая металлургия. 1975. – № 11. – С. 27–29.
130. Некрасов З. И. К методике определения силовых параметров валковых прессов по характеристикам уплотнения порошковых материалов / [З.И. Некрасов, Б.Н. Маймур, В.А. Носков, В.В. Меркулов] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1983. – С.7–8.
131. Большаков В.И. 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.

132. Некрасов З.И. Лабораторная установка для изучения процесса горячего прессования / [З.И. Некрасов, В.В. Меркулов, В.А. Носков и др.] // Порошковая металлургия. – 1975. – № 12. – С. 91–92
133. Баюл К.В. Аналитическое исследование влияния геометрических параметров формующих элементов валковых прессов на процесс брикетирования / К.В. Баюл // Порошковая металлургия – 2012. – №3/4. – С.38-49.
134. Баюл К.В. 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.
135. Носков В.А. Исследование влияния конфигурации формующих элементов на напряженно-деформированное состояние и параметры уплотнения мелкофракционных шихт / В.А. Носков, К.В. Баюл // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – № 2. – С.104–108.
136. Носков В.А. Оценка влияния конфигурации формующих элементов на энергосиловые параметры брикетирования в валках / В.А. Носков, К.В. Баюл // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 14. – Днепропетровск.: «Визион». – 2006. – С.278–285.
137. Попильский Р.Я. Прессование порошковых керамических масс / Р.Я. Попильский, Ю.Е. Пивинский // М.: Металлургия, 1983. – 176 с.
138. Лещинский В.М. Исследования и алгоритмизация расчета напряженно-деформированного состояния порошковой среды при сжатии наклонными плитами / В.М. Лещинский, А.Г. Блохин, Стоянов А.А. // Порошковая металлургия. – 1994. - №7/8. – С.13–19.

139. Юрченко Е.А. Управление распределением плотности при осевом прессовани изделий сложной формы / Е.А. Юрченко, М.Б. Штерн // Порошковая металлургия. – 1993. – №4. – С.7–12.
140. Радомысельский И.Д. Распределение плотности и давления прессования при разных схемах уплотнения в жестких матрицах / [И. Д. Радомысельский, М. Б. Штерн, Г. Г. Сердюк и др.] // Порошковая металлургия. – 1982. – №1. – С.9–15.
141. Fayed M.E. Handbook of powder science & technology / M.E. Fayed, L. Otten. – 2th Edition. – N.Y.: Chapman & Hall, 1997. – 898p.
142. Finite element simulation as a tool for design and optimization of roller press performance by Dr. Roman T. Dec, Prof. Antonios Zavaliangos and Richard K. Komarek (5th UBC-McGill International Symposium on Particle Size Enlargement in Mineral Processing, Canada, August 22-25, 2004, Proceedings, p. 409-419.
143. Optimizing of roller press forming cavity profile using finite element simulation by Dr. Roman T. Dec, Prof. Antonios Zavaliangos (XXIV International Mineral Processing Congress, Beijing, China, Proceedings, Vol.3, September 24-28, 2008, pp. 3175-3181) ISBN 978-7-03-02271-9.
144. Воробей С.А. Прогнозирование износа рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки / С.А. Воробей // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. — Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2006. — Вип. 12. — С. 213-220. — Бібліогр.: 8 назв. — рос.
145. Kim D.H. Prediction of the wear profile of a roll groove in rod rolling using an incremental form of wear model / [D.H. Kim, Y. Lee, S. J. Yoo, W.Y. Choo and B.M. Kim] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture January 1, 2003 vol. 217 no. 1 p. 111-126.
146. Смирнов В.С. Применение вариационного принципа Лагранжа к задачам обработки давлением металлических порошков / В.С. Смирнов, Н.Н. Павлов, С.Е. Виноградов // Обработка металлов давлением и сварка – Л.: Машиностроение, 1970. – С. 75-78.

147. Грин Р. Дж. Теория пластичности пористых сред / Р. Дж. Грин // Механика. – 1973. - №4. – С.109-120.
148. Каташинский В.П. Напряженно-деформированное состояние прокатываемого порошка в зоне уплотнения / В.П. Каташинский, М.Б. Штерн // Порошковая металлургия. – 1983. - №11. – С.17-21.
149. Гунн Г.Я. Моделирование на ЭВМ и исследование процесса прокатки пористых материалов / [Г.Я. Гунн, С.А. Стебунов, Д.Ю. Ганелин, А.А. Фролов] // Порошковая металлургия. – 1983. - №11. – С.21-26.
150. Баюл К.В. 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.
151. Литовченко Н.В. К оценке износа валков станов прокатки тонкой листовой стали / Н.В. Литовченко, В.Н. Заверюха // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1966. – № 11. – С.83–86.
152. Holm R. Electrical Contacts / R. Holm. – Stockholm: H/ Gerbers, 1946. – 398 p.
153. Burwell J.T. On the Empirical Law of Adhesive Wear / J.T. Burwell, C.D. Strang // J.Appl. Phys. – 1952. – Vol. 23, № 1. – p. 18–28.
154. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов // М.: Машиностроение, 1977. – 526с.
155. Маймур Б.Н. Разработка и испытания средств контроля усилия прессования в валковых прессах / Б.Н. Маймур, К.В. Баюл, А.Т. Лебедь, В.И. Петренко, С.В. Ващенко, А.Г. Соя // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 20. – Днепропетровск, «Визион».– 2009. – С.320-327.
156. http://khpi-iip.mipk.kharkiv.edu/library/ai/conspai/ Морозов М. Н. Курс лекций по дисциплине «Системы искусственного интеллекта» Лаборатория систем мультимедиа, Марийский государственный технический университет.
157. Муромцев Д.И. Введение в технологию экспертных систем / Д.И. Муромцев // СПб: СПб ГУ ИТМО, 2005. – 93с.

158. Баюл К.В. 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.
159. Евстафьев, И.Н. Организация сбора данных для выбора оптимальной стратегии управления ТОиР / И.Н. Евстафьев // Металлург. – 2009. - № 3. – С.30-33.
160. Комонюк О.В. Информационная поддержка управленияремонтно-эксплуатационной деятельностью / О.В. Комонюк, И.Н. Антоненко // Главный инженер. – 2007. - №5. – С.35–41.
161. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: справочник / А.И. Ящура. // М.: Изд-во НЦЭНАС, 2006. — 360 с., ил.
162. Баюл К.В. 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.
163. Баюл К.В. 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.
164. Жданович Г.М. Теория прессования металлических порошков. – М.: Металлургия, 1969. – 64с.
165. Нарва В.К., Панов В.С. Функциональные порошковые наноматериалы: учебно-методический комплекс: в 4т.: Т.2. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2010. – 148 с.
166. Бальшин М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. – 336с.

167. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия: Учебник для техникумов – 3-е изд. перераб. / М. Металлургия, 1991. – 432с.
168. ГОСТ 29012-91 «Порошковая металлургия. Метод определения изменения размеров прессовок после снятия давления прессования и во время спекания» Код: ГОСТ 29012-91 Статус: Действующий. Дата принятия: 01.07.1992 г.
169. Витязь П.А. Деформация конденсата при формовании и активное спекание сферических порошков при получении пористых материалов / [П.А. Витязь, В.Н. Ковалевский, А.В. Ковалевская и др.] / Литье металлургия. – №2 (65). – 2012. – С.139-145.
170. Носков В.А. Обзор исследований процесса брикетирования мелкофракционных материалов в валковых прессах / В.А. Носков, К.В. Баюл // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 11. – Днепропетровск. – 2005. – С. 289–293.
171. Носков В. А., Баюл К.В. Исследование напряженного состояния и характера износа бандажей брикетировочных валковых прессов. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – No1. – С.78–82.
172. Баюл К.В. 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.
173. Baiul K. The experimental study of compaction parameters and elastic after-effect of fine fraction raw materials / K. Baiul, A. Khudyakov, S. Vashchenko, P. Krot at al. // Mining Science. – 2020. – Vol.27. – p. 7-18. https://doi.org/10.37190/msc202701.
174. Баюл К.В. 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.

175. Баюл К.В. 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 и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2017. – Вып. 31. – С.298-308.
176. Баюл К.В. 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.
177. Баюл К.В. 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.
178. 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.
179. Аксенов Г.И. Вопросы порошковой металлургии и прочности металлов / Г.И. Аксенов, А.Н. Николаев, Ю.Н. Семенов // вып. 2. К., Изд-во АН УССР, 1955, С.119-140.
180. Аксенов Г.И. Теория и практика прокатки металлических порошков в советском союзе / [Г.И. Аксенов, Г.А. Виноградов, Е.Б. Ложечников, Г.Ф. Тихонов] // Порошковая металлургия. – 1967. - №11. – С.9-18.
181. Шомин И.П. Определение максимальной скорости прокатки порошкообразных материалов / И.П. Шомин, П.В. Классен, И.М. Кувшинников // Порошковая металлургия. – 1976. – №10. – С.14-18.
182. Катрус О.А. Вычисление верхней критической скорости прокатки порошков / О.А. Катрус, Р.Л. Оганян // Порошковая металлургия. – 1971. – №7. – С.12-18.

183. Катрус О.А. Критические скорости при прокатке порошков / О.А. Катрус // Порошковая металлургия. – 1978. - №1. – С.35-39.
184. Носков В.А. 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.
185. G. Bindhumadhavan, J.P.K. Seville, M.J. Adams, R.W. Greenwood, S. Fitzpatrick, Roll compaction of a pharmaceutical excipient: Experimental validation of rolling theory for granular solids, Chemical Engineering Science, Volume 60, Issue 14, 2005, Pages 3891-3897, ISSN 0009-2509, https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.02.022.(http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250905001223).
186. Brykietowanie pylistej soli kamiennej w prasach walcowych — Briquetting of dusty rock-salt roll process / Bogdan KOSTURKIEWICZ, Andrzej JANEWICZ // Chemik: nauka-technika-rynek ; ISSN 0009-2886. — 2012 t. 66 nr 5, s. 412–417. — Bibliogr. s. 414, 417. — Tekst pol.-ang.. — Granulacja – proces wciąż ważny: IX ogólnopolskie sympozjum „Granulacja 2012” : stan techniki oraz zastosowania procesów i aparatów do granulacji.
187. Прушак В.Я. Пути совершенствования прессового оборудования калийного производства / В.Я. Прушак, В.А. Данилов, Н.Ю. Кондратчик // Горная механика и машиностроение. – 2016. – №3. – С.61-68.
188. Johanson, J.R. Roll press feed systems/ Powder Handling & Processing, Vol. 8, №2, (April/June 1996), p. 159-163.
189. Wennerstrum S. Ten things you need to consider whenchoosing and installing a roller press system. Powder and bulk engineering, 2000, February, p. 37-47.
190. Kosturkiewicz B., Janewicz A., Hryniewicz M. Selection method for the roll press feeder. Journal of Machine Construction and Maintenance, 2017, 3, pp.45-51.
191. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч1 – С.-Пб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. – 848с.

192. Дурнев А.С., Першин В.Ф. Измерение статического и кинематического коэффициентов внешнего трения сыпучих материалов // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. 2013. №4(47). С. 152-157.
193. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластмасс. Принцип действия, конструирование и эксплуатация / Г. Шенкель; пер. с нем. – Л.: Госхимиздат, 1962. 467 с.
194. Баюл К.В. Разработка алгоритма определения рациональных параметров шнекового подпрессовщика валкового пресса / [К.В. Баюл, А.Ю. Худяков, С.В. Ващенко, Н.А. Солодкая и др.] // «Компьютерное моделирование: анализ, управление, оптимизация»: материалы VI международной научно-технической конференции. – ДВНЗ УДХТУ: Днепр. – 04-06.11.2020. – С. 182-183. (ДВНЗ УДХТУ).
195. Баюл К.В. 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 2018г., г. Могилев) – Могилев, 2018. – с.70-71.
196. Акимов С. В. Анализ проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза / С. В. Акимов // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24). – Ч. 2. – С. 204–211.
197. Rao S.S. Engineering Optimization: Theory and Practice. Fourth Edition. John Wiley and Sons, 2009. 813 p. https://doi.org/10.1002/9780470549124
198. Saaty, T.L. and Vargas, L.G. Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks. New York: Springer, 2013. 370p.
199. Rao S.S. Engineering Optimization: Theory and Practice. Fourth Edition. John Wiley and Sons, 2009. 813 p. https://doi.org/10.1002/9780470549124

200. Худяков А.Ю. Брикетирование каолинового сырья для производства кускового шамота / [А.Ю. Худяков, С.В. Ващенко, К.В. Баюл, Семенов Ю.С.] // Новые огнеупоры. – 2018. – №8 – С.14-19. https://doi.org/10.17073/1683-4518-2018-8-14-19
201. Baiul K. 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.
202. Баюл К.В. 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.
203. Баюл К. В. 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.
204. Baiul K. Selection of rational surface configuration for roller press tires / K. Baiul, N. Solodka, A. Khudyakov et al. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2020 – Vol.59 – №1-2 – PP. 9-20. https://doi.org/10.1007/s11106-020-00133-w.
205. Баюл К.В. 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.
206. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, ISBN 0-07-054371-2, McGraw-Hill.
207. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*, with Luis G. Vargas, ISBN 0-7923-7267-0, Kluwer Academic.

208. *Decision Making* with *Dependence* and *Feedback*: The *Analytic* Network *Process*: The Organization and Prioritization of Complexity. Front Cover. *Thomas L. Saaty*. Rws Publications, Jun 1, 2001 – Education – 370 p.
209. Пат. 88846 України. Валковий прес для брикетування дрібнофракційних матеріалів; опубл. 25.11.2009. Бюл. № 22.
210. Носков В.А. Валковый пресс для брикетирования мелкофракционных отходов производства и сырья / В.А. Носков // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1999. № 2-3. – С.100-102.
211. 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 201805641. Опубл. 10.10.2018. Бюл. №19.
212. Баюл К.В. Науково-технічні рішення щодо виготовлення та подальшої експлуатації вдосконаленого валкового пресу конструкції з розширеними технологічними можливостями та підвищеним ресурсом експлуатації / [Баюл К.В., Ващенко С.В., Худяков О.Ю., Солодка Н.О. та ін.] // 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.
213. Баюл К.В. 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.
214. https://www.deltaww.com/en-US/products/Inverters-AC-Motor-Drives/ALL/

ДОДАТКИ

Додаток 1

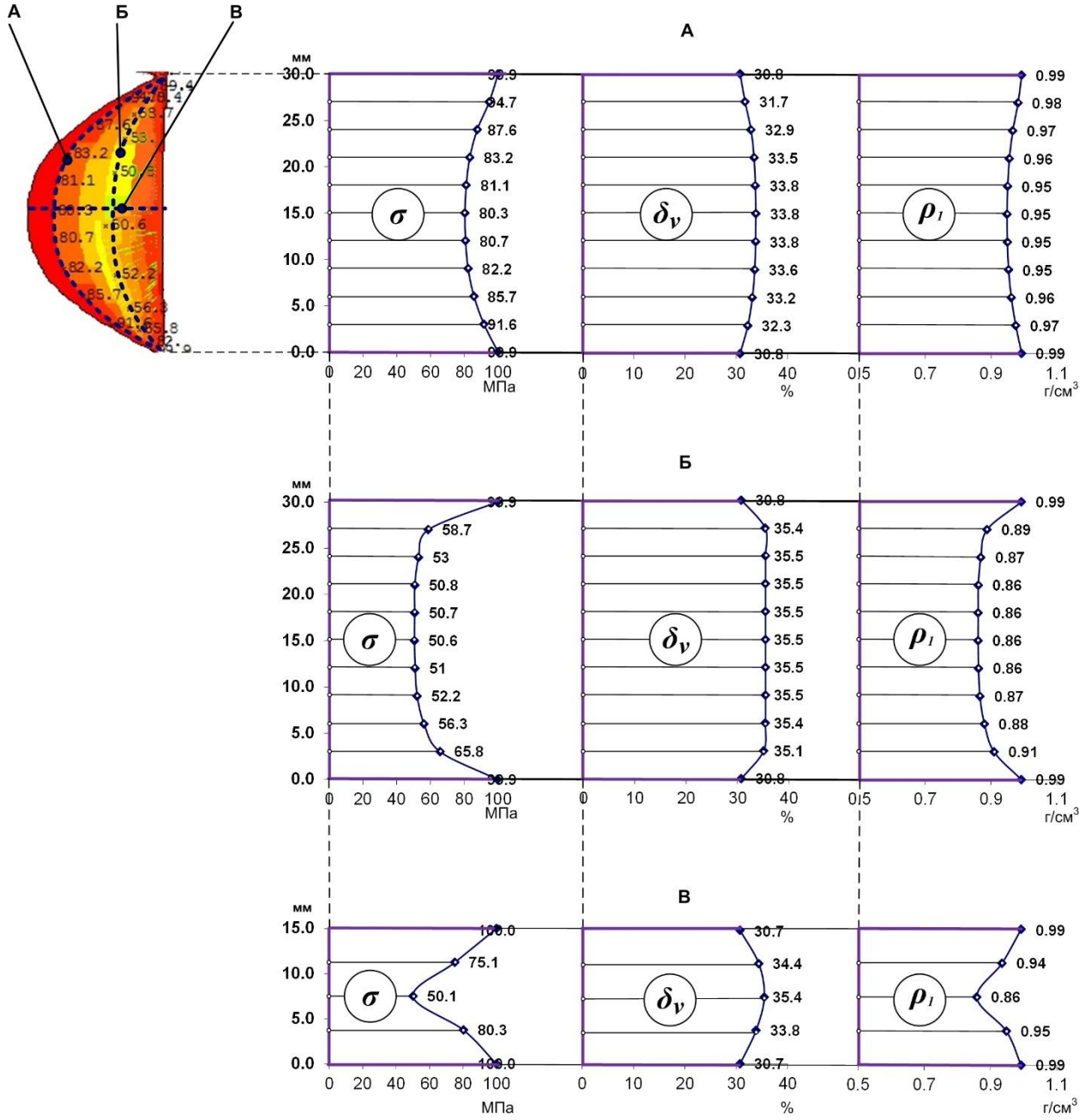


Рисунок 1 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів R14, матеріал – торф (фр. -3мм)

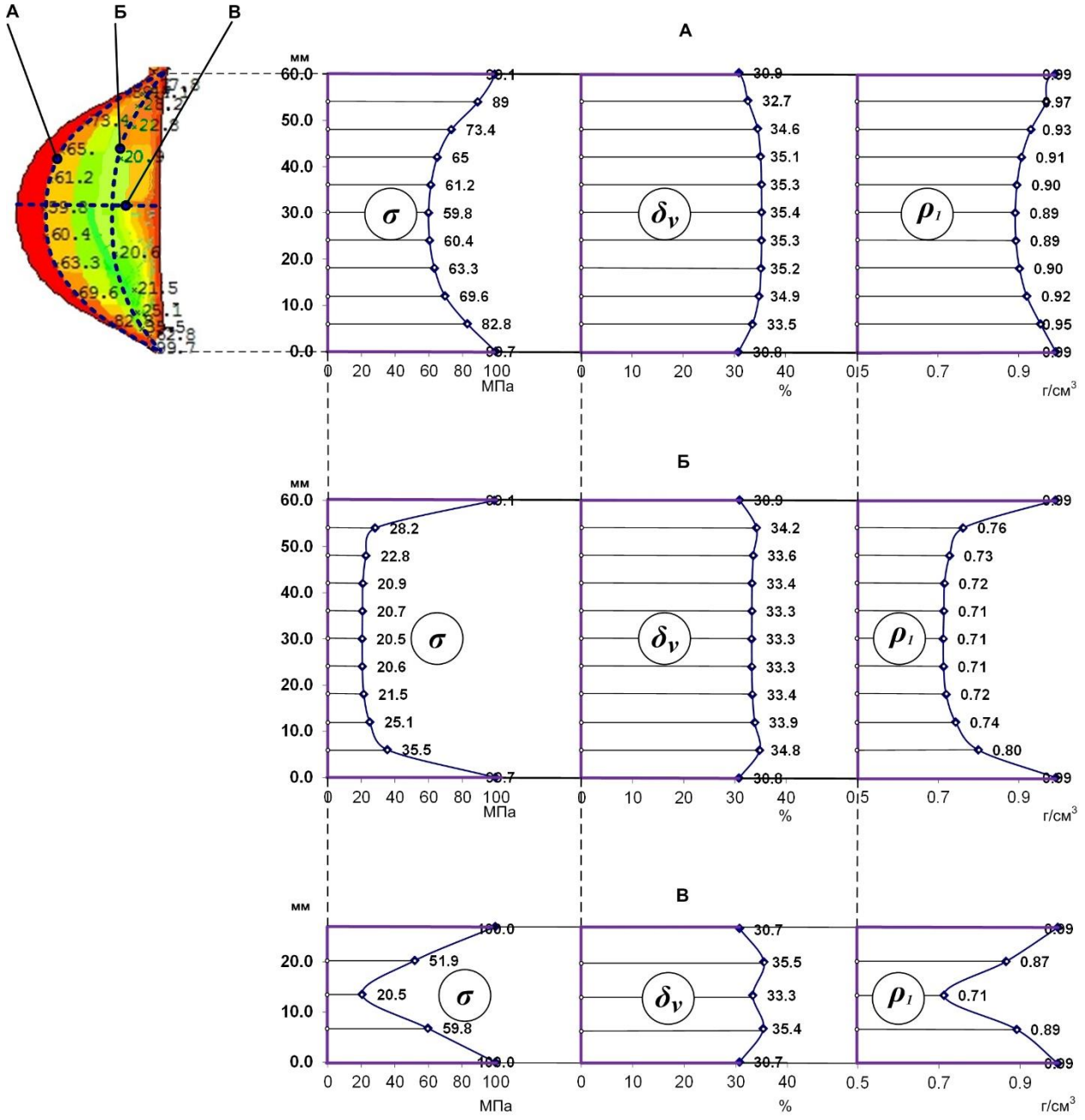


Рисунок 2 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів R24, матеріал – торф (фр. -3мм)

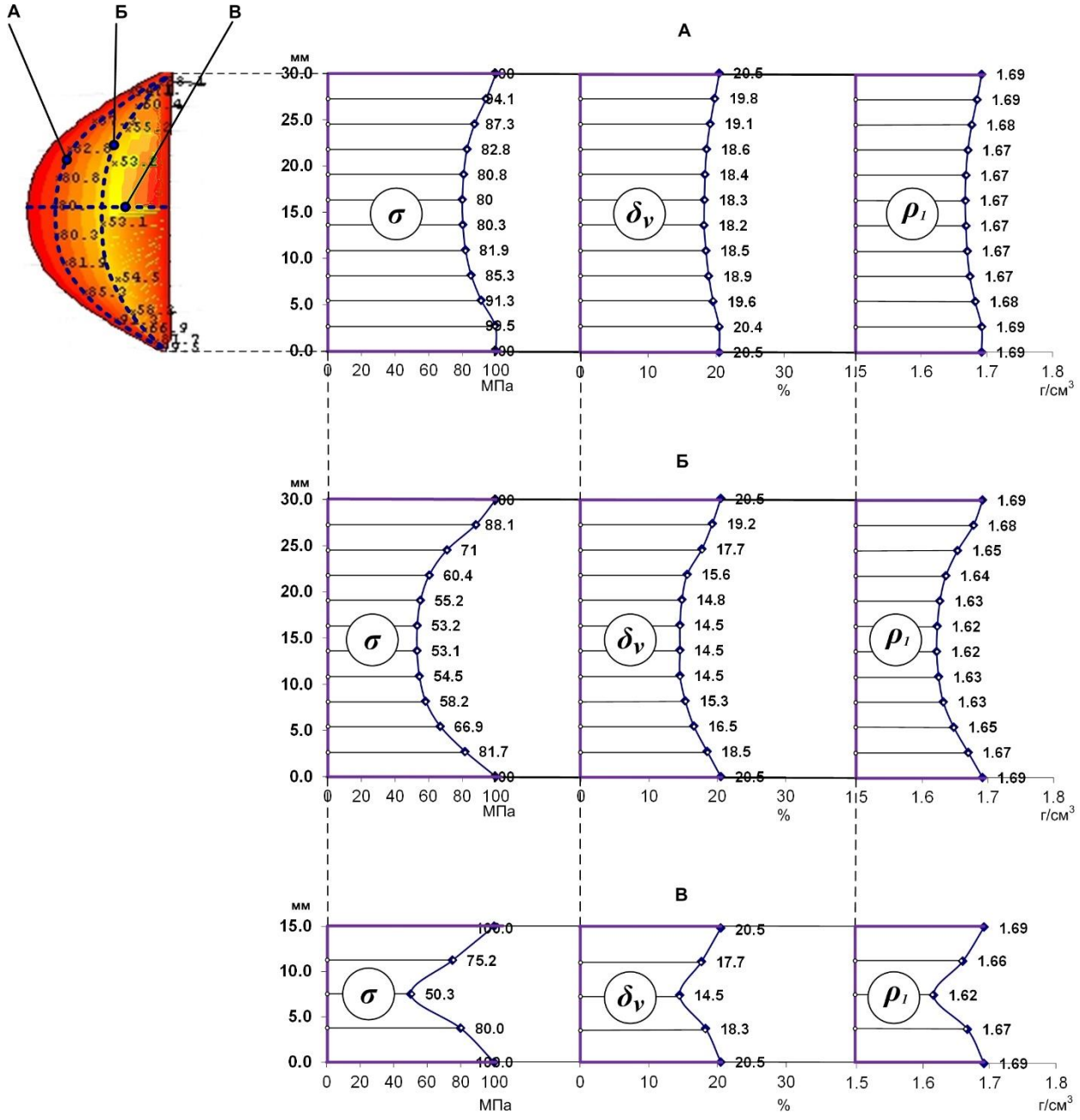


Рисунок 3 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів R14, матеріал – каолін (фр. -3мм)

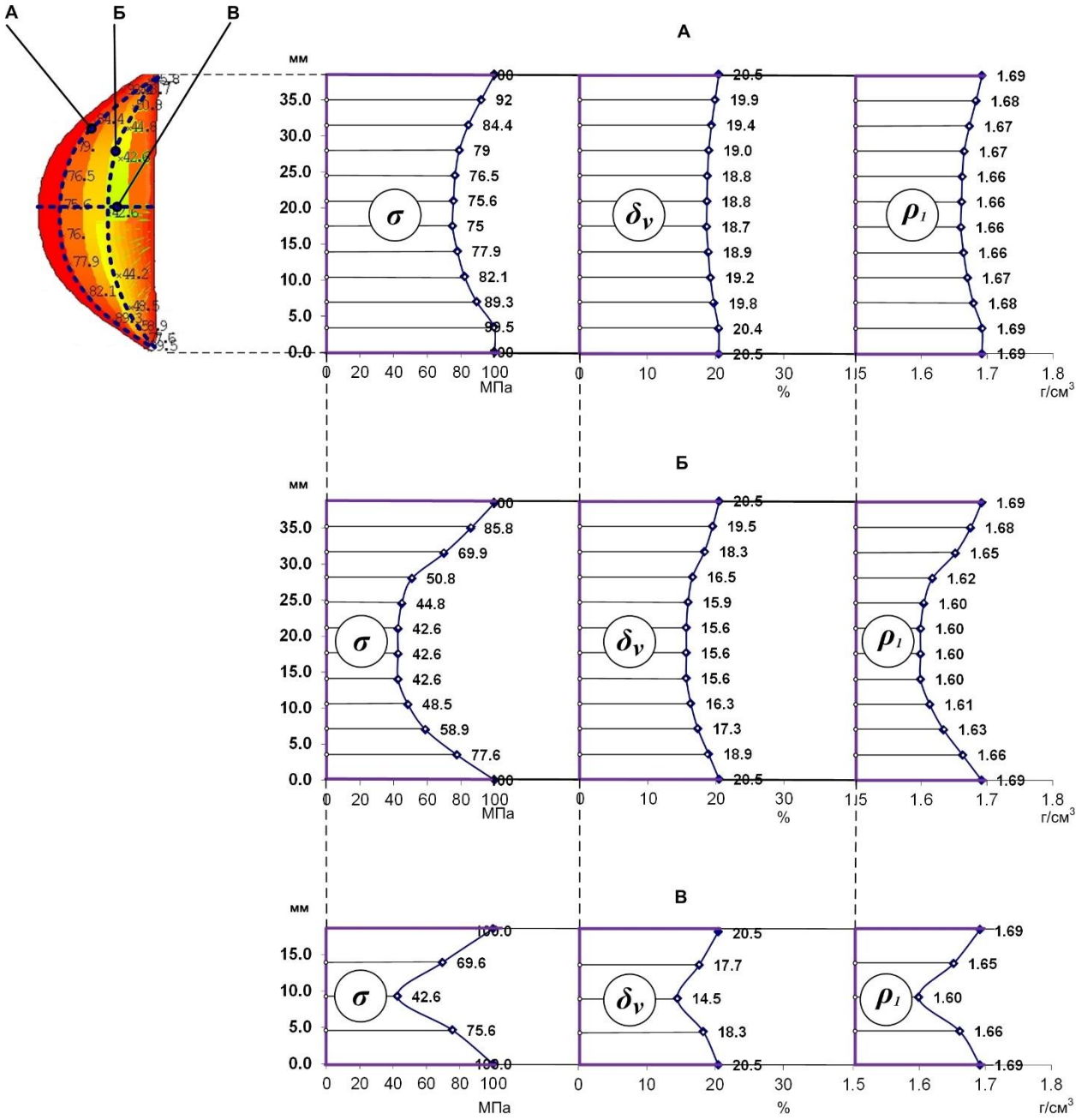


Рисунок 4 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів R17, матеріал – каолін (фр. -3мм)

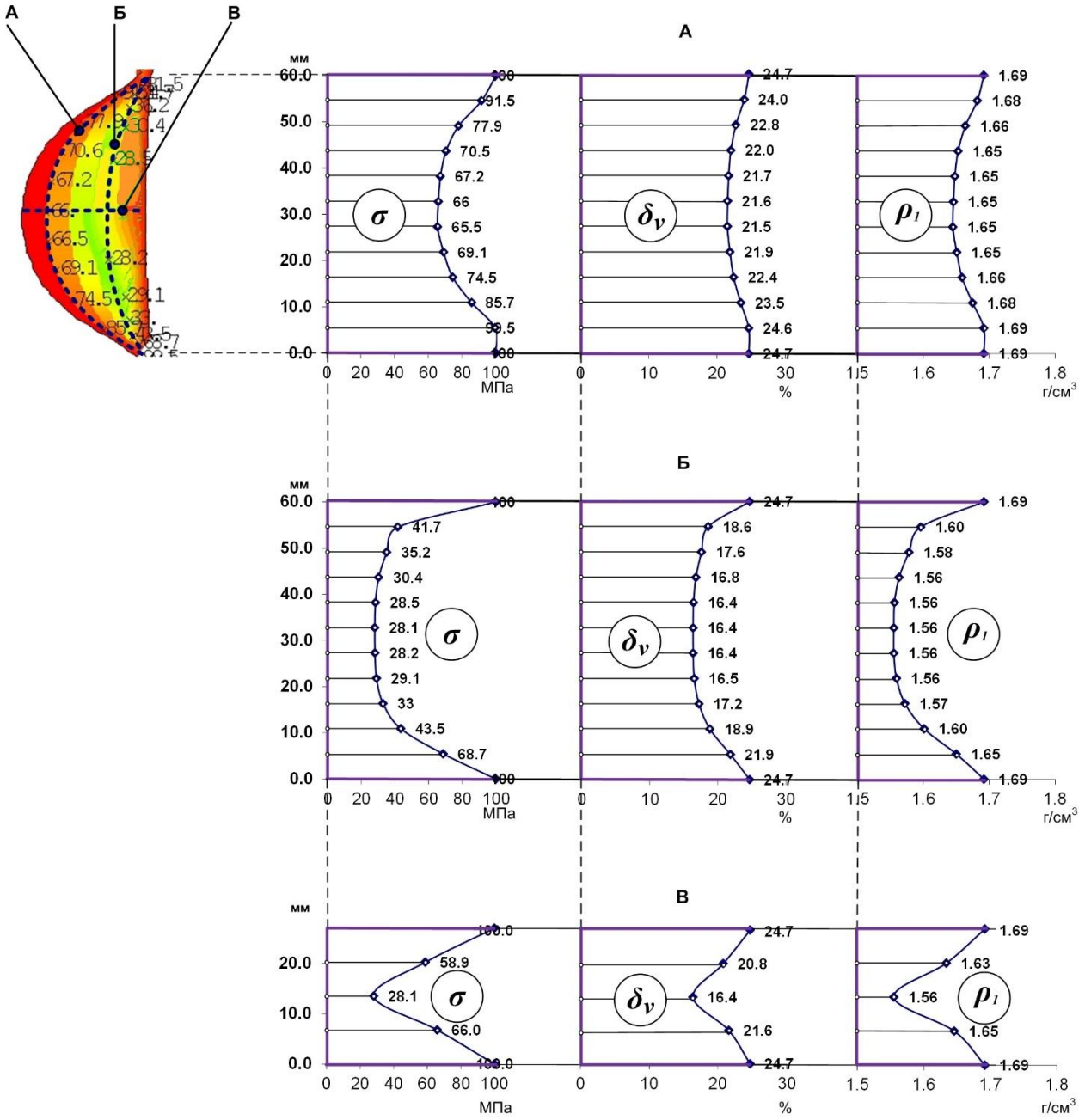


Рисунок 5 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів R24, матеріал – каолін (фр. -3мм)

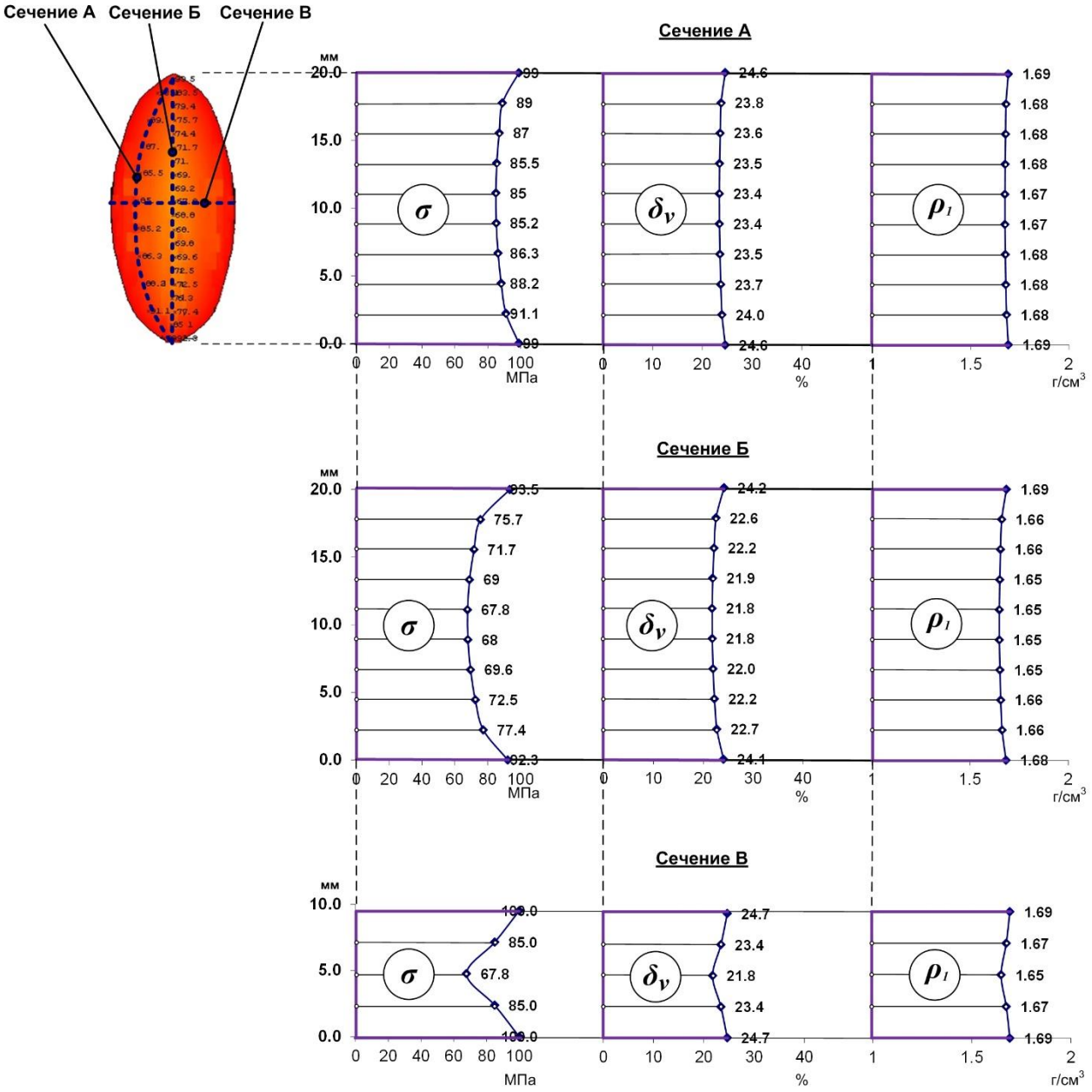


Рисунок 6 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів L20, матеріал – каолін (фр. -3мм)

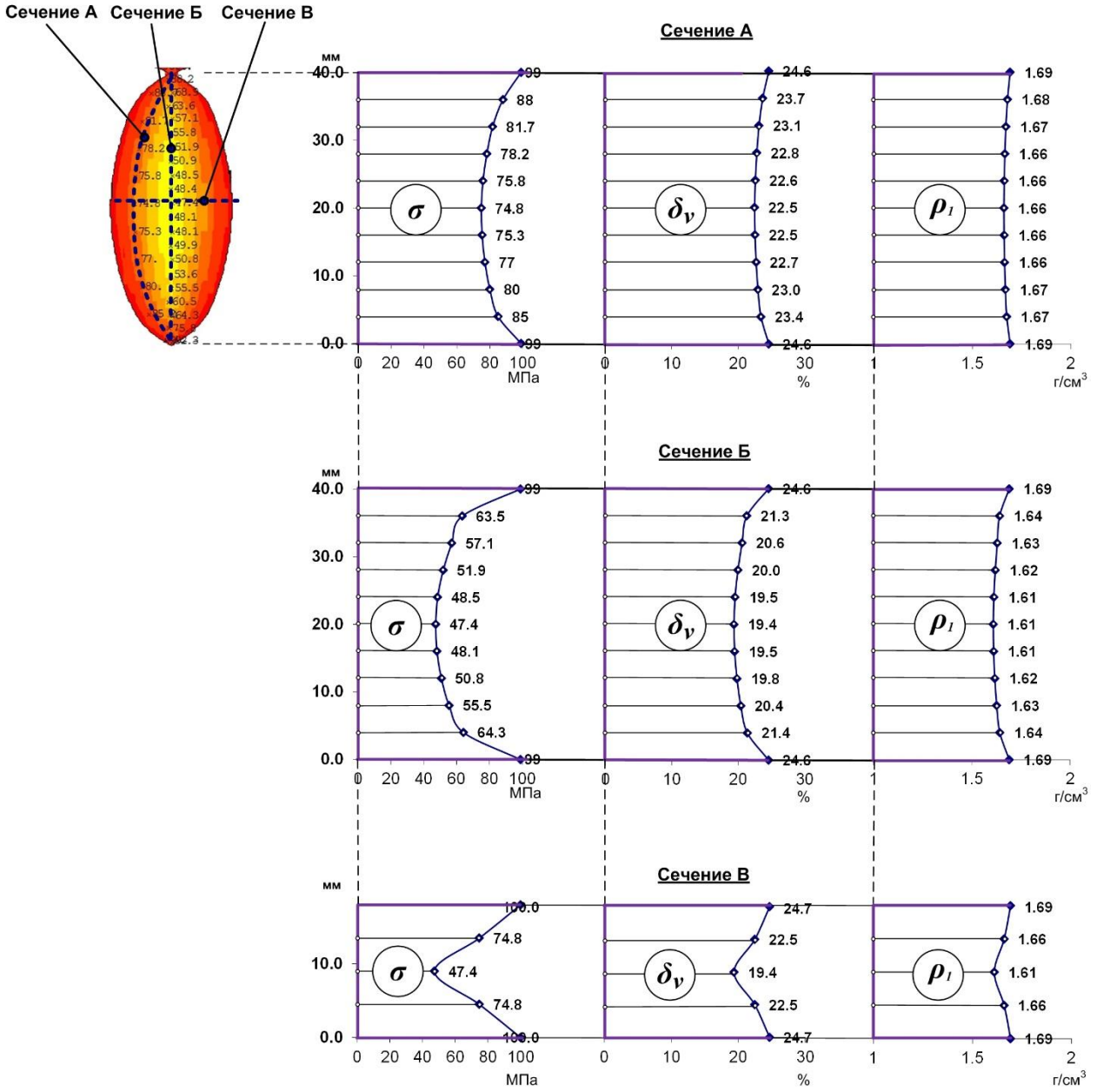


Рисунок 7 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів L40, матеріал – каолін (фр. -3мм)

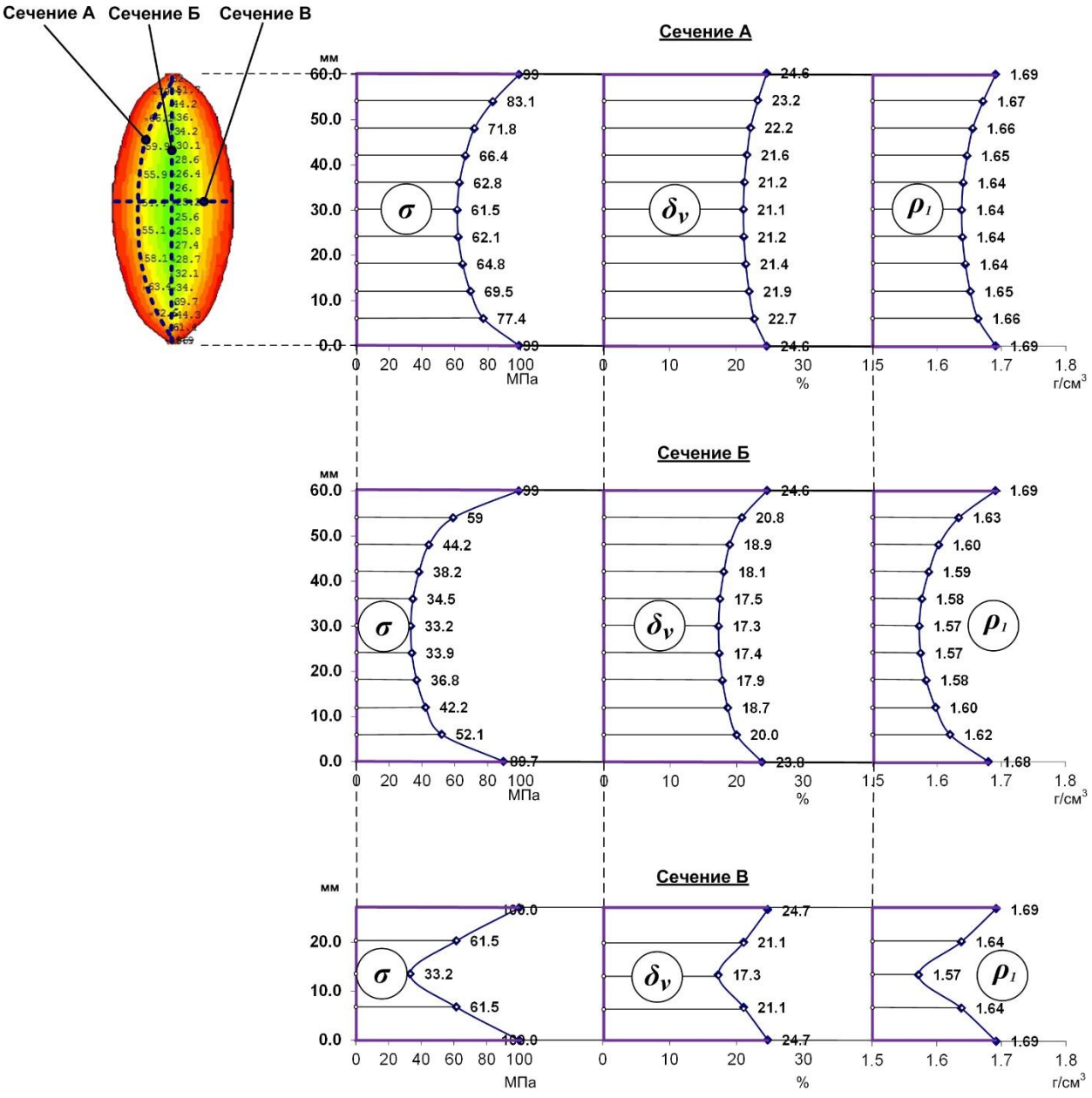


Рисунок 8 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів L60, матеріал – каолін (фр. -3мм)

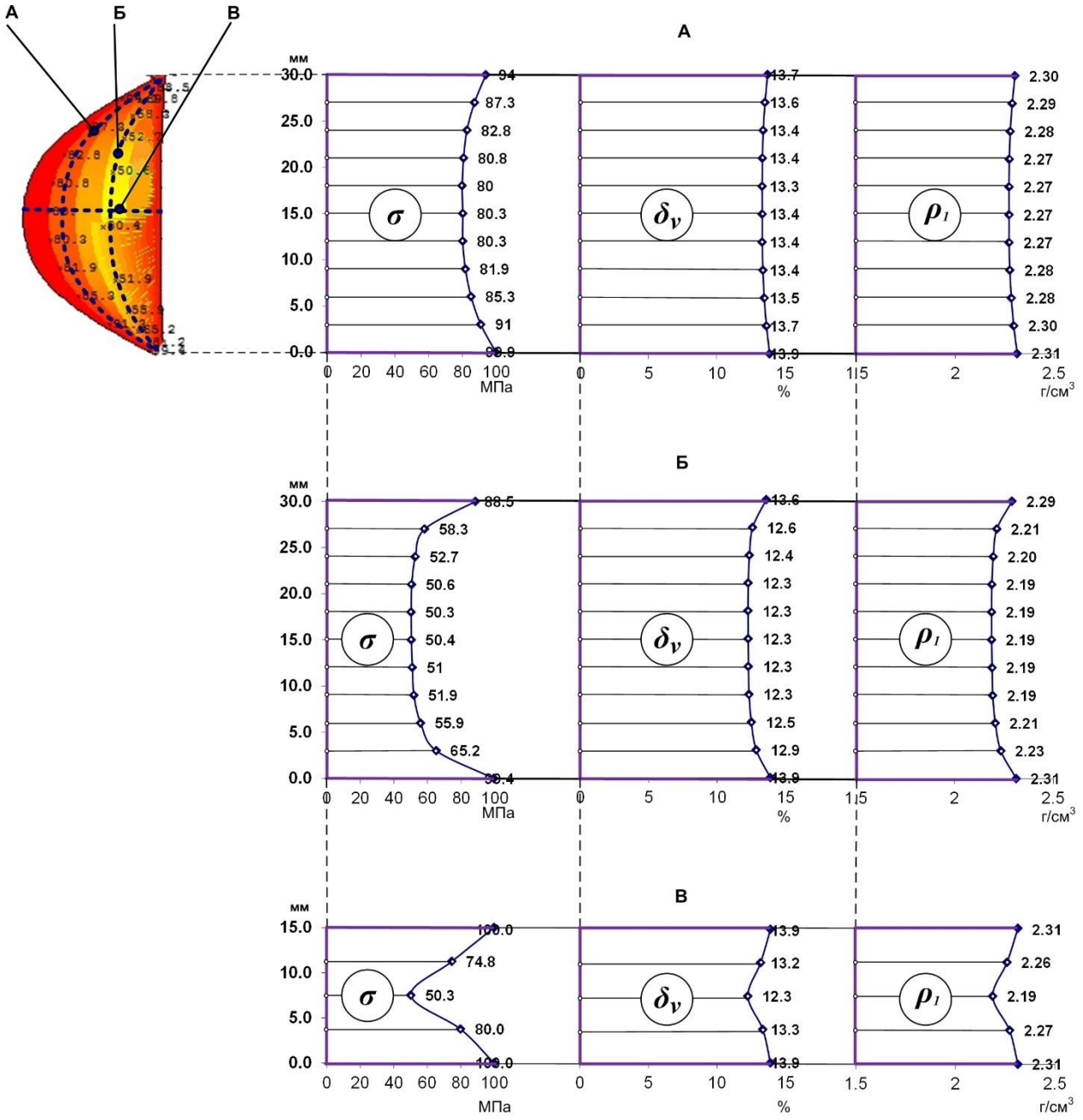


Рисунок 9 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів R14, матеріал – марганцевий концентрат (фр. -3мм)

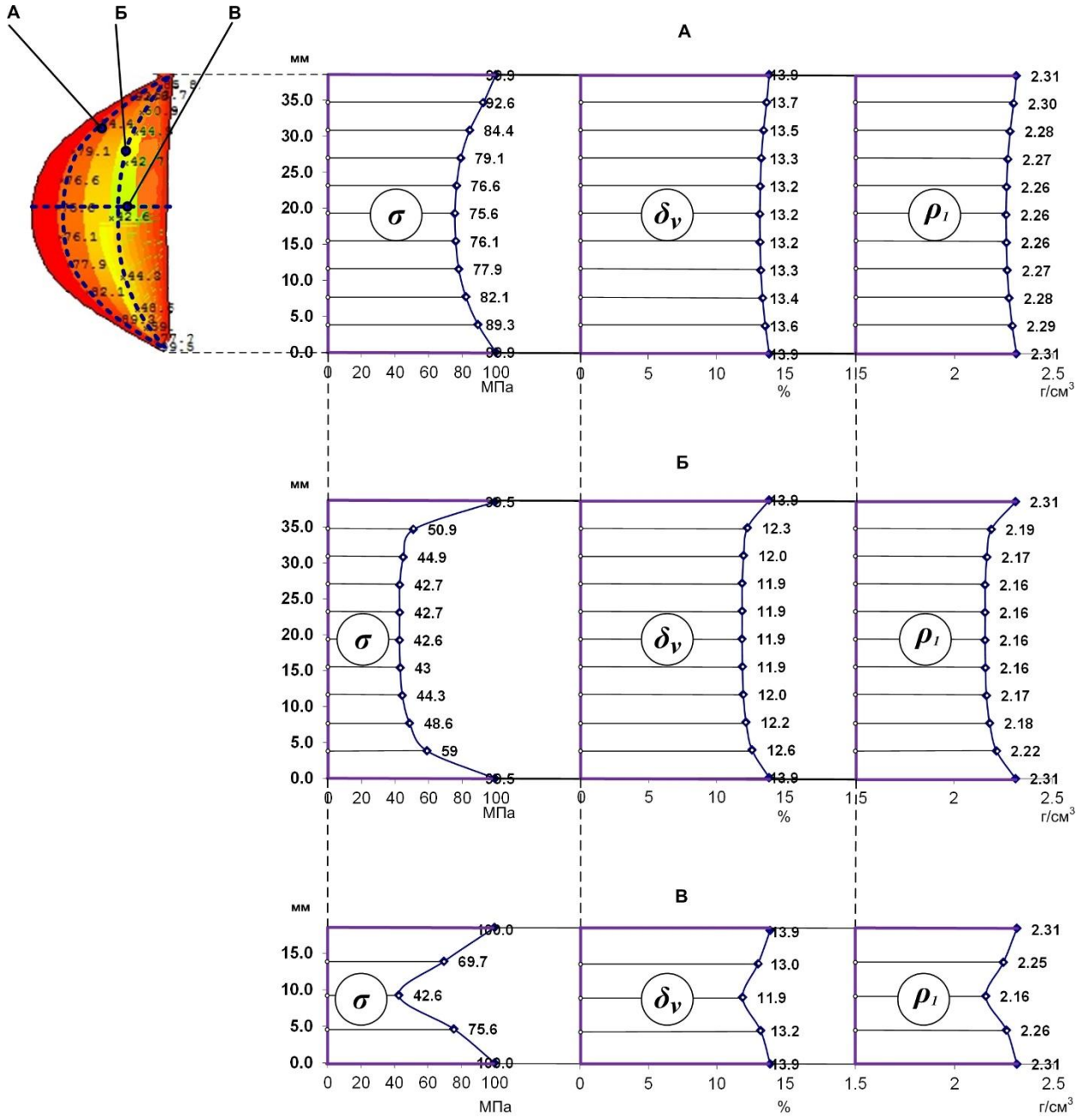


Рисунок 9 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів R17, матеріал – марганцевий концентрат (фр. -3мм)

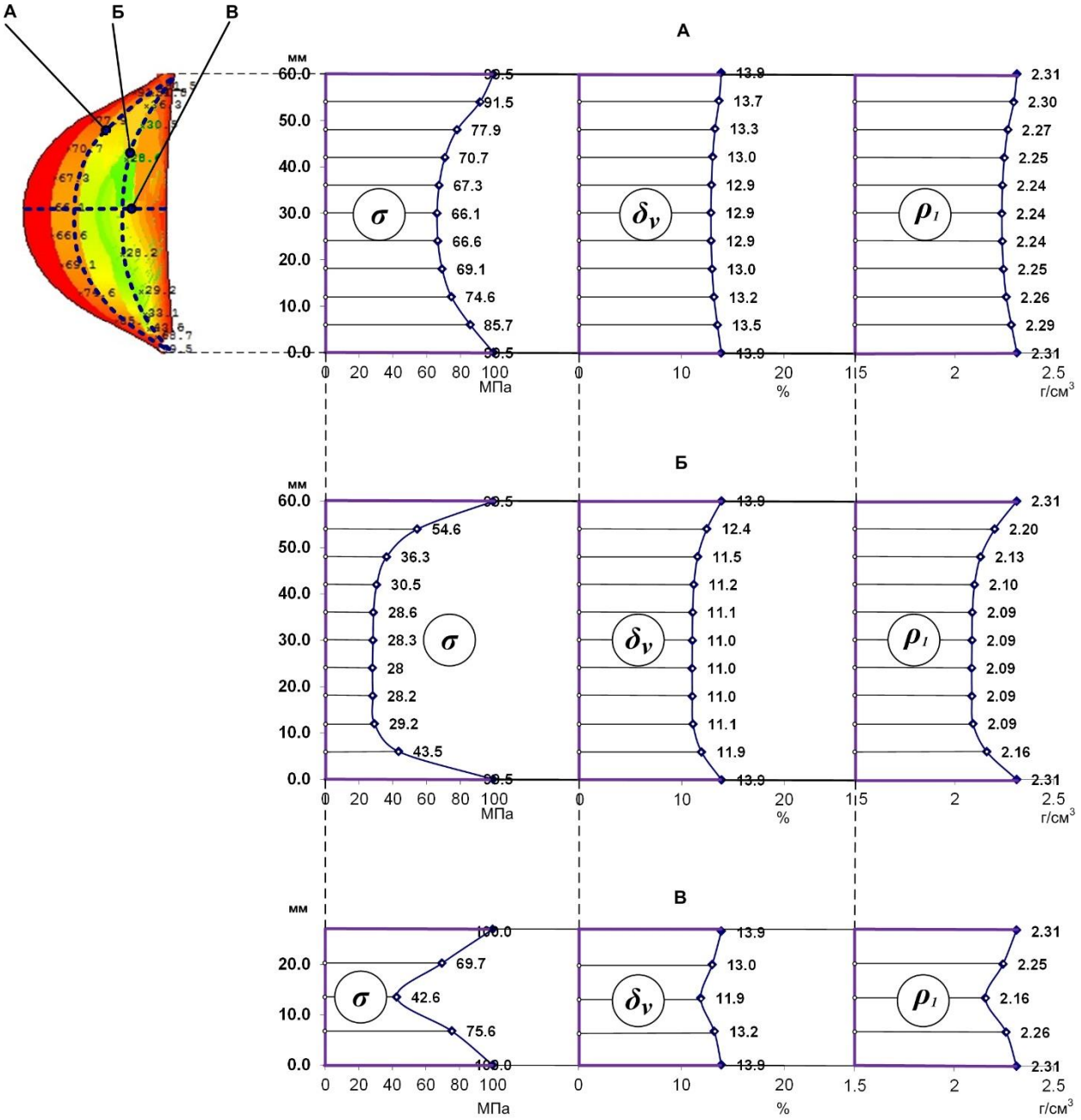


Рисунок 10 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів R24, матеріал – марганцевий концентрат (фр. -3мм)

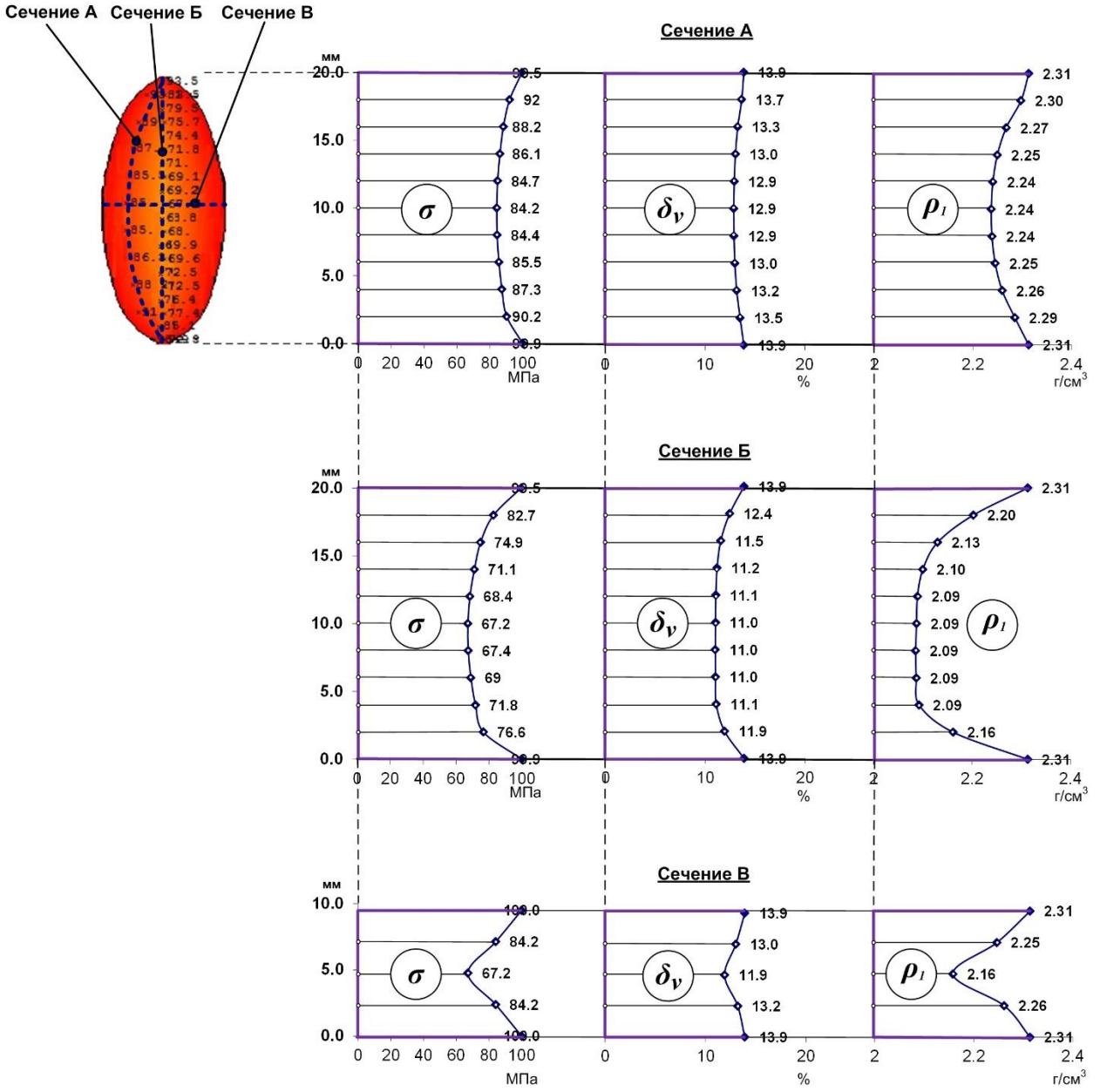


Рисунок 11 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів L20, матеріал – марганцевий концентрат (фр. -3мм)

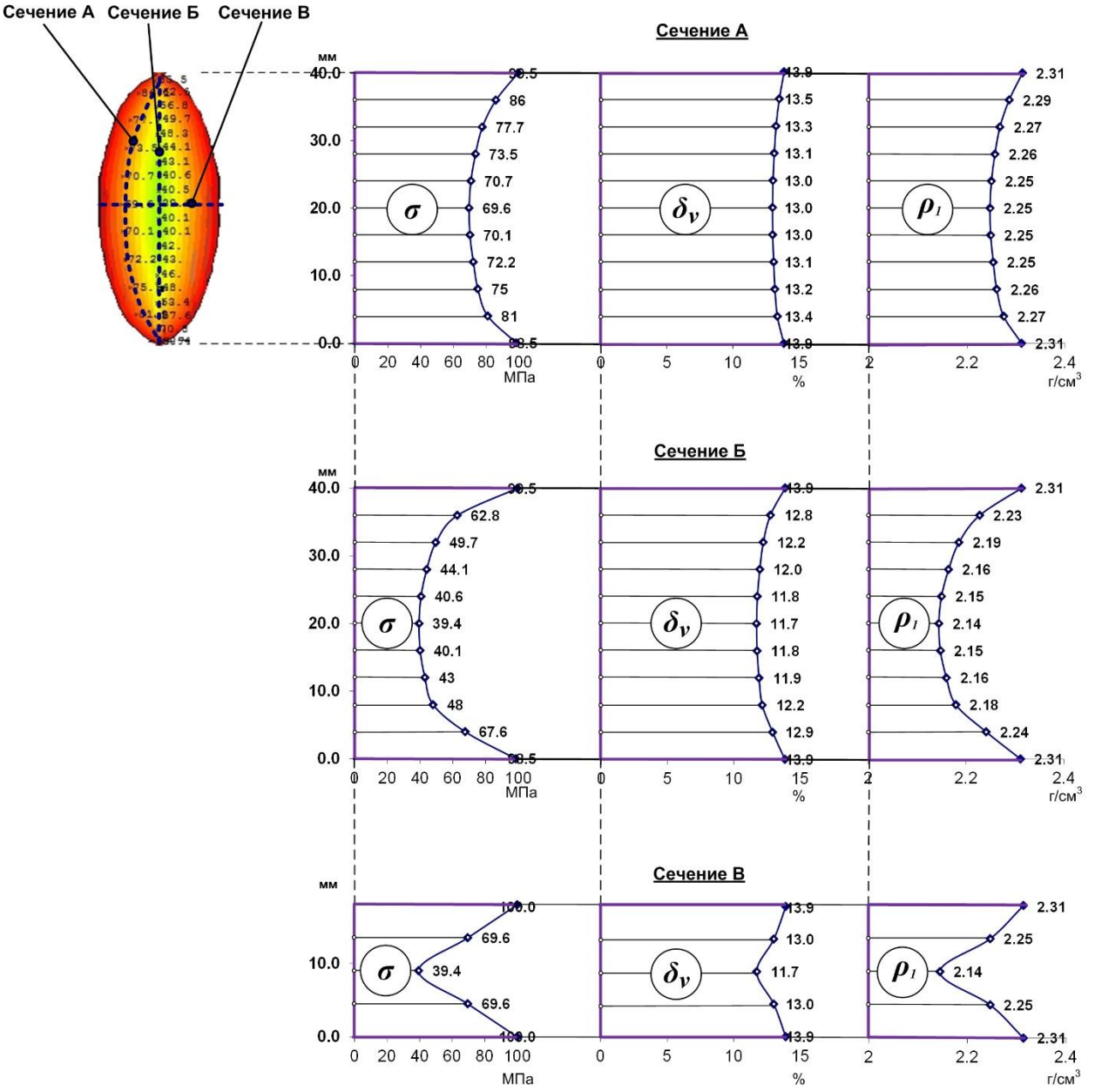


Рисунок 12 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів L40, матеріал – марганцевий концентрат (фр. -3мм)

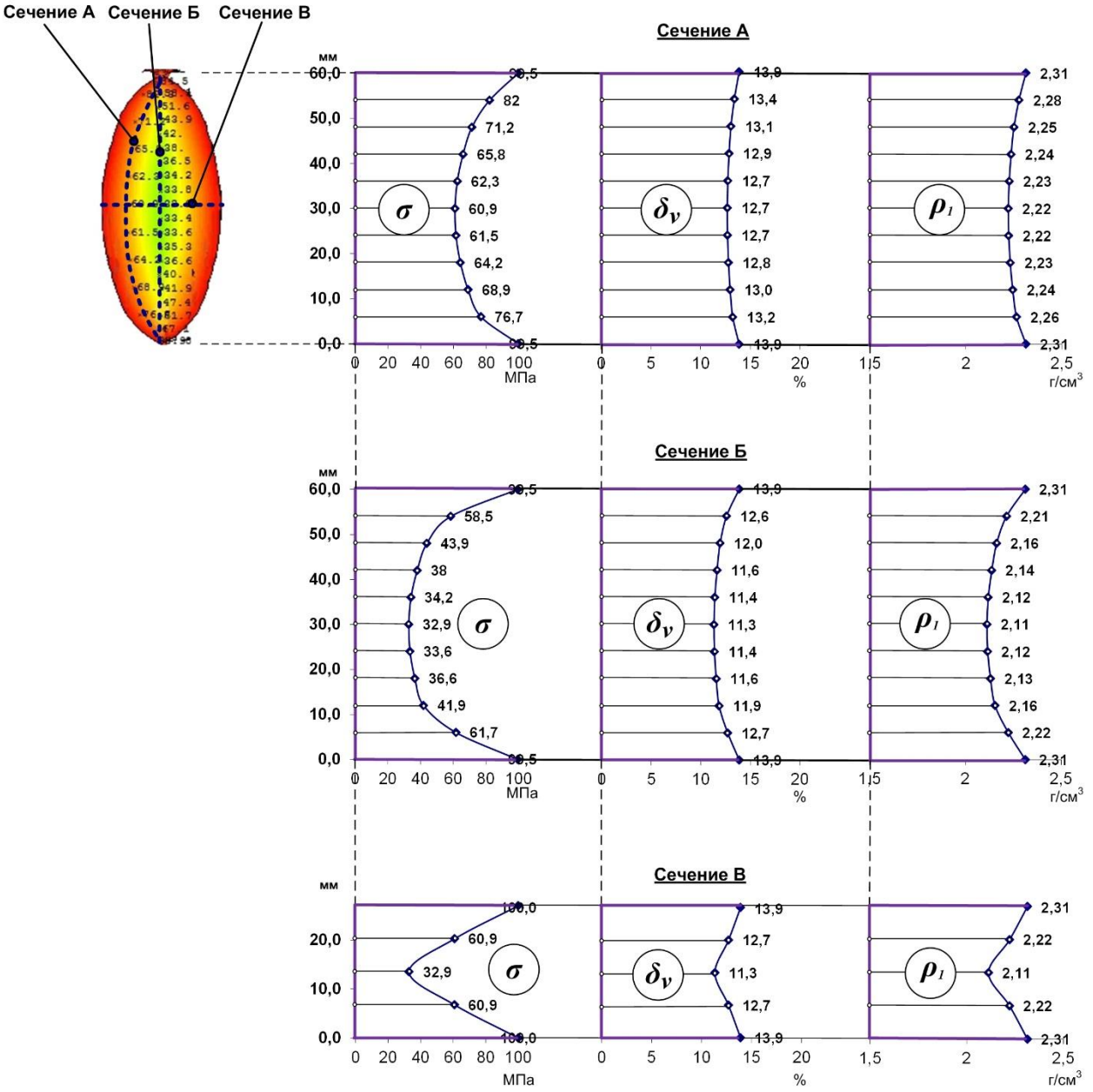


Рисунок 13 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів L60, матеріал – марганцевий концентрат (фр. -3мм)

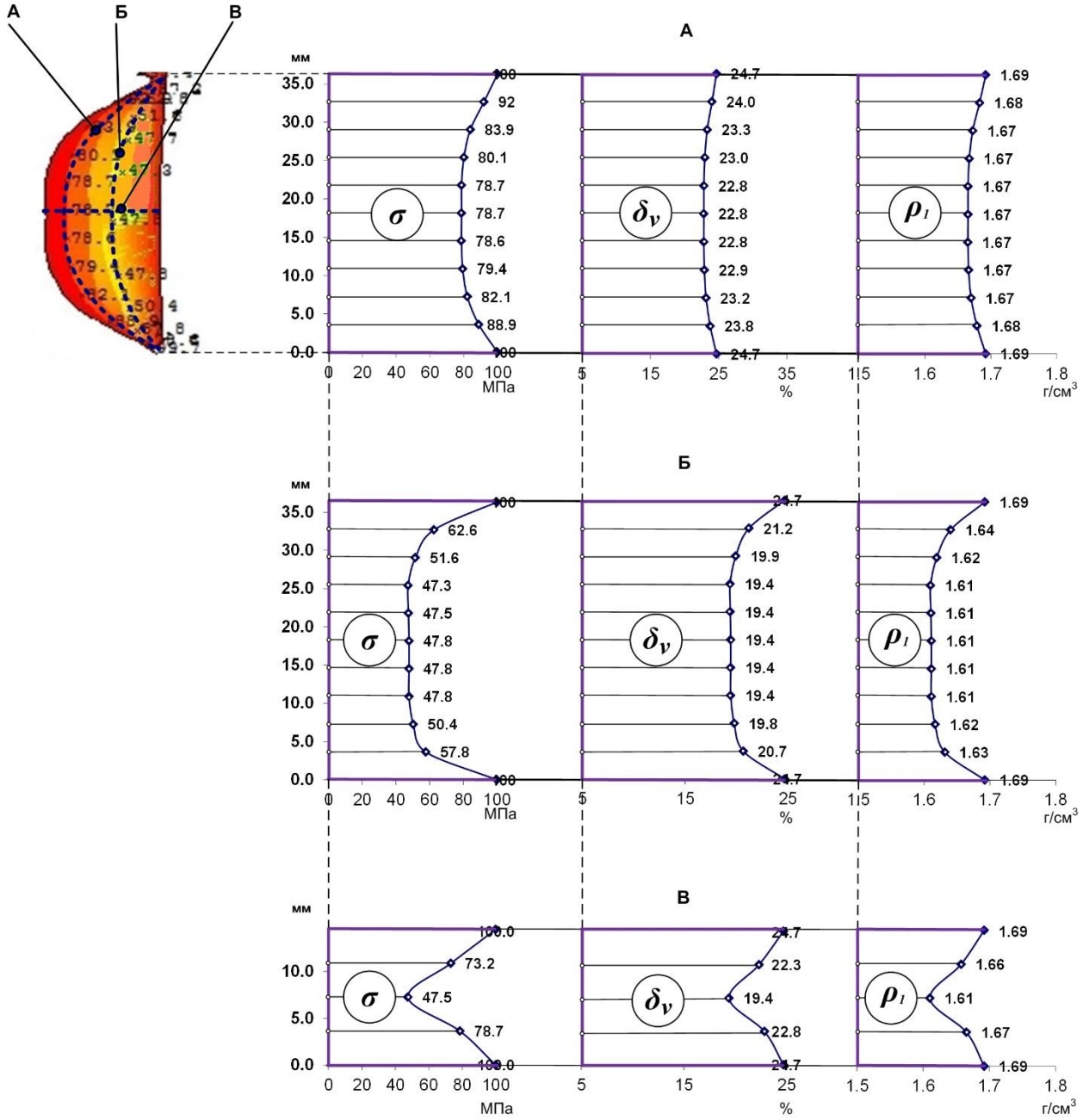


Рисунок 14 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів LR15, матеріал – каолін (фр. -3мм)

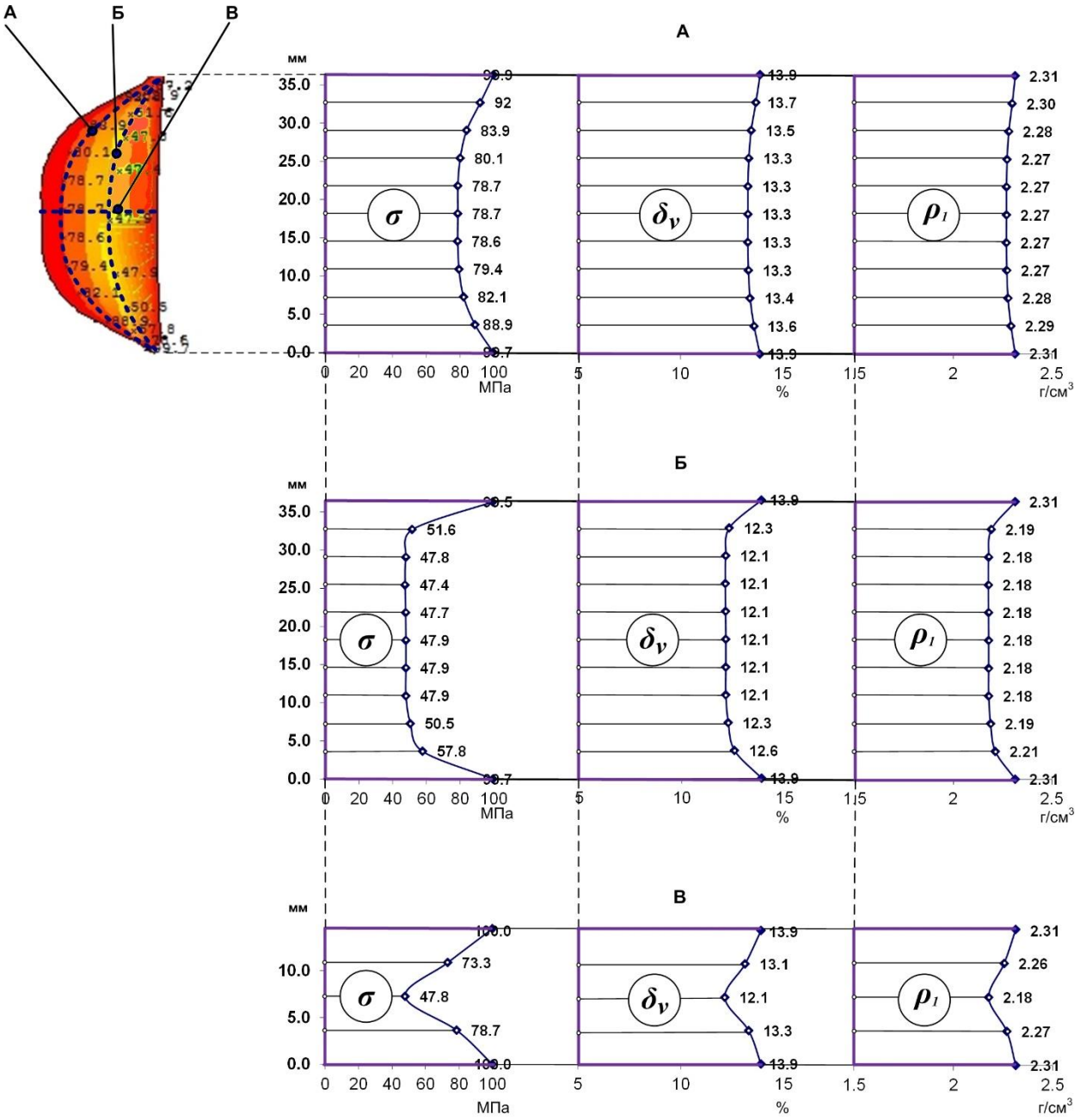


Рисунок 15 – Епюри розподілу в брикеті напружень, пружної післядії та щільності, конфігурація формуючих елементів LR15, матеріал – марганець (фр. -3мм)

ПРОМБРИКЕТ
ТОПЛИВНЫЕ БРИКЕТЫ

Товариство з обмеженою відповідальністю
НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО
Сайт: prombriket.in.ua
Юридична адреса:49000,м. Дніпро, вул. Князя Ярослава Мудрого, буд.27.
ЄДРПОУ 40351318 ІПН 403513104633
Р/р UA 32 305299 00000 26005050016150 в ПАТ КБ «ПРИВАТБАНК» МФО 305299

Вих.№ 137

Від 10.11.2020 р.

Для представлення в спеціалізовану
вчену раду Д 08.084.03 при
Національній металургійній академії
України

Акт

Даним актом підтверджується, що на базі результатів дисертаційної роботи Баюла Костянтина Васильовича «Розвиток наукових основ створення валкових пресів з розширеними технологічними можливостями та збільшеним ресурсом експлуатації» виготовлений та впроваджений шнековий підпресовник, який в становлено на валковий прес, що працює в складі лінії брикетування широкої гами сировинних матеріалі для металургії та енергетики на ТзОВ НВП «Промбрикет».
Промислове використання шнекового підпресовника показало його ефективність та достатню ступінь надійності. Оснащення валкового преса конструкції Інституту чорної металургії НАН України шнековим підпресовником дозволило підприємству розширити номенклатуру матеріалів, що брикетується. Стало можливим отримання на валковому пресі якісних брикетів з матеріалів з малою насипною щільністю до 0,4 г/см^3, зокрема, лігніну, торфу, бурого вугілля і т. ін. Також застосування шнекового підпресовника дозволило налагодити виробництво композитних паливних брикетів для металургії та енергетики на базі вугільного та коксового дріб'язку з додаванням інших вуглецевих матеріалів. При цьому використання підпресовника дозволило знизити кількість сполучних речовин при виробництві брикетів, що в свою чергу, сприяло підвищенню економічної ефективності виробництва.

Директор ТзОВ НВП «Промбрикет» Кузьменко С.В.

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО
ІНСТИТУТУ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ ІМ. З.І.НЕКРАСОВА
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ"
(ДП "ЕВП ІЧМ")
пл. Академіка Стародубова 1-А, м. Дніпро, 49050, Тел./факс: (067)633-33-90; (067)636-29-73
E-mail: eppichm@ukr.net; epichm@ukr.net Код ЄДРПОУ 00190578

03.10.2020 № 189 На № _____ від _____

АКТ

щодо актуальності та впровадження результатів дисертаційної роботи «Розвиток наукових основ створення валкових пресів з розширеними технологічними можливостями та збільшеним ресурсом експлуатації» кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника відділу технологічного обладнання та систем управління Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ) Баюла Костянтина Васильовича

Забезпечення енергетичної безпеки та ефективного використання сировини є актуальною проблемою сучасної економіки України. В умовах постійно зростаючих обсягів енерго- та ресурсоспоживання особливої актуальності набуває пошук альтернативних джерел мінеральних ресурсів та енергії.

В якості альтернативних джерел енергії можуть застосовуватися композитні паливні брикети. Основними компонентами для виробництва композитного твердого палива у вигляді брикетів є дрібні фракції низькосортного кам'яного вугілля, бурого вугілля, гідролізного лігніну і торфу, які змішуються в певних пропорціях з рослинною біомасою, технічним вуглецем, RDF або дрібними фракціями високоякісного вугілля.

В якості вторинних мінеральних ресурсів ефективним та перспективним є залучення до технологічних циклів виробництва у вигляді брикетів вторинної мінеральної сировини, що утворюється на металургійних та гірничодобувних підприємствах.

ДП «Експериментально виробниче підприємство Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України» (ЕВП ІЧМ) та Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ) співпрацюють протягом багатьох років і одним з напрямків такої співпраці є створення технологій та обладнання для брикетування дрібнофракційних матеріалів. Така співпраця сприяла розвитку наукових та технічних розробок спеціалістами ІЧМ, до яких саме відноситься дисертаційна робота Баюла К.В.

В результаті виконання дисертаційної роботи та ряду робіт за тематикою ІЧМ за участю Баюла К.В. розроблена технічна документація

щодо виготовлення та подальшої експлуатації валкових пресів наступних модифікацій.

Перша – для роботи з гравітаційною подачею шихти в осередок деформації зі збільшеною шириною робочої поверхні валків (2×360 мм) для досягнення високої продуктивності до 50 т/годину.

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 високих значень коефіцієнта ущільнення (≥3,0). Продуктивність, що досягається даною модифікацією становить до 30 т/годину.

Третя модифікація продуктивністю 3 до 25 т/годину, в залежності від конкретних технологічних умов, може оснащуватись підпресовником. При необхідності можливий його швидкий демонтаж і робота в умовах гравітаційної подачі шихти (як правило при насипній щільності ≥0,6г/см^3) з використанням спеціального пристрою, що регулює обсяг матеріалу, який подається в міжвалковий простір. Дана модифікація преса виготовлена ЕВП ІЧМ спільно з підприємствами-партнерами та показала свою надійність та ефективність при брикетуванні широкої гами дрібнофракційних матеріалів.

Розроблені модифікації валкових пресів призначені для брикетування дрібнофракційних матеріалів, переважно, фракції 0...5 мм. В залежності від конфігурації пресуючих поверхонь розроблені модифікації валкових пресів дозволяють отримувати брикети об'ємом від 5 до 55 см^3, що дає суттєві технологічні переваги пресу на ринку обладнання для брикетування.

Створені в рамках роботи преси є вітчизняною конкурентоспроможною альтернативою, як в технічному, так і в економічному плані, закордонним зразкам аналогічних машин. Розроблена документація на виготовлення валкових пресів та їх вузлів передана до ЕВП ІЧМ.

До того ж в рамках договірних робіт та співпраці з вітчизняними підприємствами з використанням результатів дисертаційної роботи Баюла К.В. виконано наступні розробки:

- впроваджено технологію брикетування карбіду кремнію та вдосконалену конструкцію валків преса (ТзОВ «П'ятихатський завод металургійних сумішей»);
- створено експериментально-промисловий шнековий підпресовник валкового преса для брикетування вуглецевих енергетично цінних дрібнофракційних матеріалів (ТзОВ «Промбрикет»);
- запропоновані рекомендацій щодо вдосконалення конструкції шнекового підпресовника та лінії приводу преса (ТзОВ «Біогумос»);
- запропоновано проект технології виробництва ущільненого продукту з дрібнофракційних та пиловидних залізовмісних вторинних матеріалів (ПАТ «ММК Ілліча», ПАТ «Азовсталь»).

Директор ЕВП ІЧМ _____ Баришев Є.В.

Общество с ограниченной ответственностью
Пятихатский
завод металлургических смесей

Украина, 52100 Днепропетровская обл., г. Пятихатки ул. Клименко, 2
р/с 26002060367739 в КБ "Приватбанк" г.Днепропетровска, МФО 305299,
ОКПО 36722828, ИНН 367228204282 Св. .№ 1404284500023
т/ф (050) 320-46-18, pzms2008@gmail.com

Вих. № 86

Від 23.07. 2020 р.

Акт

В процесі співпраці з Інститутом чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України на нашому підприємстві під час проведення ремонтного відновлення зношених поверхонь валків брикетного преса шляхом наплавлення та подальшої механічної обробки були сформовані профілі робочих поверхонь валків з новими геометричними співвідношеннями, які базуються на результатах досліджень дисертаційної роботи Баюла Костянтина Васильовича за темою «Розвиток наукових основ створення валкових пресів з розширеними технологічними можливостями та збільшеним ресурсом експлуатації».

Відновлений шляхом наплавлення зношених робочих поверхонь комплект валків з середнім діаметром 648 мм та шириною робочої поверхні 360 мм був встановлений на валковому пресі, який входить до складу лінії брикетування на нашому підприємстві. Відновлені валки мають зубчасто-жолобчасті формуючі елементи з трансформованим профілем, що забезпечує більш рівномірний розподіл ущільнення матеріалу в брикетах.

В ході експлуатації відновленого комплекту валків з новим типом профілю пресуючих поверхонь вироблялися брикети об'ємом 19…21см^3. Перевірка показників якості брикетів, отриманих з шихт на базі паливних матеріалів (вугілля, коксовий дріб'язок, торф) та на основі металургійного карбіду кремнію показала їх відповідність необхідним параметрам щільності та міцності. Також відзначено зниження дефектів в виді розшарувань та розтріскувань.

Таким чином, даним актом підтверджується ефективність впровадженого технічного рішення конструктивного виконання робочих поверхонь валків, яке може бути рекомендовано до промислового використання при виготовлені валкових пресів, а також при заміні зношених комплектів кільцевих бандажів на пресах, які працюють в складі діючих виробництв.

Директор
ТзОВ «Пятихатський завод
Металургійних сумішей» Мережко О.В.

Товариство з обмеженою відповідальністю «Пятихатський завод металургійних сумішей» № 36722828 Україна