

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра електрифікації, автоматизації
виробництва та інженерної екології
Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Левандовський Олександр Миколайович

УДК 620.93

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Розробка електромагнітного сепаратора для очистки технологічних
рідин металообробних станків ремонтних підприємств в АПК

141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”
(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Палійчук В.К.

к.т.н., доцент

Житомир – 2022

АНОТАЦІЯ

Левандовський Олександр Миколайович. Розробка електромагнітного сепаратора для очистки технологічних рідин металообробних станків ремонтних підприємств в АПК. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Поліський національний університет, Житомир, 2022.

В магістерській роботі розроблено конструктивне нове технічне засіб – сітчастий концентратор неоднорідного магнітного поля, що забезпечує підвищення магнітної індукції робочому каналі сепаратора на 57 %. Встановлені оптимальні параметри концентратора (діаметр сітки 1 мм і розмір комірки 3 мм) забезпечують максимальні значення магнітної індукції при величині напруги 220 В.

Запропонована конструкція електромагнітного сепаратора для очищення рідин забезпечує очищення технологічної рідини від металевих частинок до 90 %, що відповідає ДСТУ при продуктивності установки до 100-120 л/год.

Результат розрахунку температурних полів показує, що для електромагнітного сепаратора гранично допустиме перевищення температури ізоляції котушки намагнічування при класі нагрівальності E ($t_{нагр} = 120$ °С) витримує температуру нагріву $t_{внутр} = 51,2$ °С, яка відповідає отриманому експериментальному значенню $T_k = 51$ °С. Малогабаритний електромагнітний сепаратор не вимагає спеціальних охолоджувальних пристроїв: відведення теплових потоків відбувається шляхом дотику нагрітих поверхонь намагнічування котушок з навколишнім простором і відповідає вимогам нормативної документації.

Ключові слова: електромагнітний сепаратор, домішки, продуктивність, рідина, температура

ANNOTATION

Oleksandr Mykolayovych Levandovskyi. Development of Electromagnetic Separator for Cleaning Technological Liquids of Metalworking Machines of Repair Enterprises in Agro-Industrial Complex. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualification work for a master's degree in the specialty 141 "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - Polissya National University, Zhytomyr, 2022.

In the master's work, a constructive new technical tool was developed - a mesh concentrator of a non-uniform magnetic field, which provides an increase in the magnetic induction of the working channel of the separator by 57%. The set optimal concentrator parameters (grid diameter 1 mm and cell size 3 mm) provide maximum values of magnetic induction at a voltage of 220 V.

The proposed design of the electromagnetic separator for cleaning liquids ensures the cleaning of process liquid from metal particles up to 90%, which corresponds to DSTU with a plant productivity of up to 100-120 l/h.

The result of the calculation of the temperature fields shows that for the electromagnetic separator the maximum allowable temperature exceedance of the insulation of the magnetizing coil at the heat resistance class E (theat = 120 °C) withstands the heating temperature $t_{\text{vnut}} = 51.2$ °C, which corresponds to the obtained experimental value $T_k = 51$ °C. The small-sized electromagnetic separator does not require special cooling devices: the removal of heat flows occurs by touching the heated magnetizing surfaces of the coils with the surrounding space and meets the requirements of regulatory documentation.

Key words: electromagnetic separator, impurities, productivity, liquid, temperature.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІДИН.....	8
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЛАБОРАТОРНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	12
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	35

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність теми дослідження. В даний час ремонтно-обслуговуючі підприємства сільського господарства поступово переходять на використання верстатного обладнання нового покоління, яке, поряд з більш високими техніко-економічними та експлуатаційними показниками, у порівнянні з традиційно використовуваним є більш чутливим до забруднення та висуває більш жорсткі вимоги до процесу експлуатації, через що класичні підходи до використання та регенерації технологічних рідин втрачають свою актуальність. У зв'язку з цим потрібні розробка та впровадження нових технічних засобів та технологічних рішень щодо очищення технологічних мастильно-охолоджуючих рідин, що відповідають сучасним вимогам.

Очищення технологічних мастильно-охолоджуючих рідин дозволяє підвищити якість обробки металевих виробів та продовжити термін служби верстатного обладнання. При цьому методи магнітного очищення, що широко використовуються, вимагають постійної досконалості.

Основним напрямом удосконалення магнітного очищення є розробка апаратів та пристроїв нового покоління – електромагнітних сепараторів з можливістю регулювання індукції магнітного поля та підвищення ступеня його неоднорідності, а також збільшення площі впливу останнього на сировину, що очищається. Недостатнє дослідження спеціальних пристроїв – концентраторів магнітного поля, що входять до складу електромагнітних сепараторів, а також методів визначення оптимальних параметрів, стримують розвиток даного напрямку.

Мета роботи - підвищення ефективності очищення технологічних рідин металообробних верстатів шляхом розробки концентраторів магнітного поля з оптимальними параметрами.

Досягнення поставленої мети вирішувалися такі:

Розробити технічні засоби для електромагнітного очищення технологічних рідин від металевих домішок та провести оцінку якості очищення до та після проходження сепарації.

Визначити конструктивні параметри концентратора магнітного поля, електричні характеристики сепаратора та температурний режим котушок намагнічування для встановлення режиму очищення матеріалу електромагнітним сепаратором.

Об'єкт дослідження: процес очищення рідких технологічних продуктів від металевих частинок на електромагнітному сепараторі.

Предмет дослідження: взаємозв'язок технічних характеристик електромагнітного сепаратора з його основними технологічними та конструкційними параметрами, що впливають на ступінь очищення металевих домішок.

Методологія та методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань застосовувалася Максвеллівська теорія електромагнітного поля, теорія електричних ланцюгів, теорія теплових полів, чисельне вирішення диференціальних рівнянь, математичний регресійний аналіз, активне планування експерименту, методи математичного моделювання на ПК з використанням програмних пакетів Simulink для моделювання напівпровідників. Maxwell для розрахунку магнітної системи сепаратора, ELCUT для теплового розрахунку котушок намагнічування.

Ступінь достовірності та апробація результатів дослідження підтверджується коректністю поставлених завдань та цілей, шляхом порівняння результатів, отриманих у ході математичних розрахунків та експериментальних досліджень.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Палійчук В. К., Левандовський О. М. Розробка експериментально-лабораторної моделі електромагнітного сепаратора. *Наукові читання–2022: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників,*

докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 7 червня 2022 р. Житомир: Поліський національний університет, 2022. С. 18-21.

2. Палійчук В. К., **Левандовський О. М.** Аналіз існуючих методів та установок для очищення технологічних рідин. *Збірник тез доповідей XXIII Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки"* (16–18 жовтня 2022 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Київ. Житомир. 2022.С. 315-317.

3. **Левандовський О. М.** Розробка експериментально-лабораторної моделі електромагнітного сепаратора. *Збірник тез VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 31 березня 2021 року, м. Житомир. С. 273-274.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність полягає в розробці технічного засобу для електромагнітного очищення технологічних рідин від металевих домішок

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 16 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 37 сторінок комп'ютерного тексту, містить 23 рисунки і 1 таблиця.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІДИН

На сьогоднішній день використовується кілька різних підходів (рис. 1.1) для очищення технологічних рідин. При цьому їх вибір визначається складом технологічних охолоджуючо-мастильних рідин (ТМОР), характером та ступенем її забруднення, а також вимогами до ступеня її очищення та особливостями технологічного процесу, такими як гранулометричний склад домішок, витрата ТМОР, кратність циркуляції, температура та ін. У більшості випадків очищення ґрунтується на фізичних (у поодиноких випадках – на фізико-хімічних) методах.

В рамках технологічних процесів очищення ТМОР застосовуються методи осадження, флотації, фільтрації, центрифугування та сепарації.

При осадженні забруднюючих домішок основою технологічного процесу покладено сила тяжкості. Даний метод застосовується, як правило, з метою попереднього очищення, при цьому використовуються спеціальні ємності - відстійники, що включаються до схеми подачі ТМОР в умовах потоку, що встановився. Процес осадження дозволяє спростити наступні стадії очищення ТМОР. Оцінка ефективності процесу осадження проводиться за критеріями повноти очищення та швидкості осадження частинок, що визначається відповідно до рівняння Стоксу [2; 13]. Даний метод є найбільш ефективним у тому випадку, якщо щільність забруднюючих частинок вище щільності рідини, що очищається.

При очищенні ТМОР методом флотації [7] використовується властивість з'єднання забруднюючих частинок з бульбашками повітря або з легкими частинками (наприклад, з невеликими включеннями олії в емульсії), в результаті чого вони піднімаються до поверхні ємності, де можна зробити їх механічне видалення з ТМОР з використанням спеціального пристосування.

Даний метод, особливо із застосуванням пропускання повітря через розчин ТМОР, є ефективним за умови видалення неметалічних домішок, щільність яких порівнянна або менше щільності очищується ТМОР.

Очищення методом фільтрації дозволяє видаляти будь-які механічні домішки з рідин незалежно від природи їхнього походження чи фізико-хімічних властивостей. Також даний метод очищення характеризується відсутністю (у більшості випадків) необхідності в перериванні потоку ТМОР, що встановився, що використовується в технологічному процесі механічної обробки. Ступінь очищення регулюється розмірами пропускних осередків фільтруючих елементів і кількістю щаблів очищення. Найбільшою мірою та швидкістю очищення характеризуються фільтри, що працюють під тиском.

Мірою ефективності фільтрації ТМОР є ступінь очищення, що характеризується відношенням масової частки затриманих системою фільтрації частинок до загальної маси забруднення, а також втрати тиску циркуляційної системи в модулі фільтрації. Ефективність даного методу обумовлена очищенням ТМОР від будь-яких видів домішок незалежно від їхньої щільності або гранулометричного складу. Недоліком даного методу є необхідність частої заміни або промивання фільтруючих елементів, а також значні втрати напору ТМОР, що призводить до необхідності значного підвищення потужності насосів системи циркуляції з пропорційним збільшенням вартості обладнання та енергетичних витрат.

Очищення ТМОР методом центрифугування з погляду фізики процесу є, залежно від конструкції обладнання, що застосовується, осадження або фільтрування дисперсної системи забрудненої ТМОР під дією відцентрових сил. У тому й іншому випадку процес центрифугування має відповідні переваги і недоліки, властиві осадження або фільтрування, при цьому обладнання може мати циклічний або безперервний тип дії.

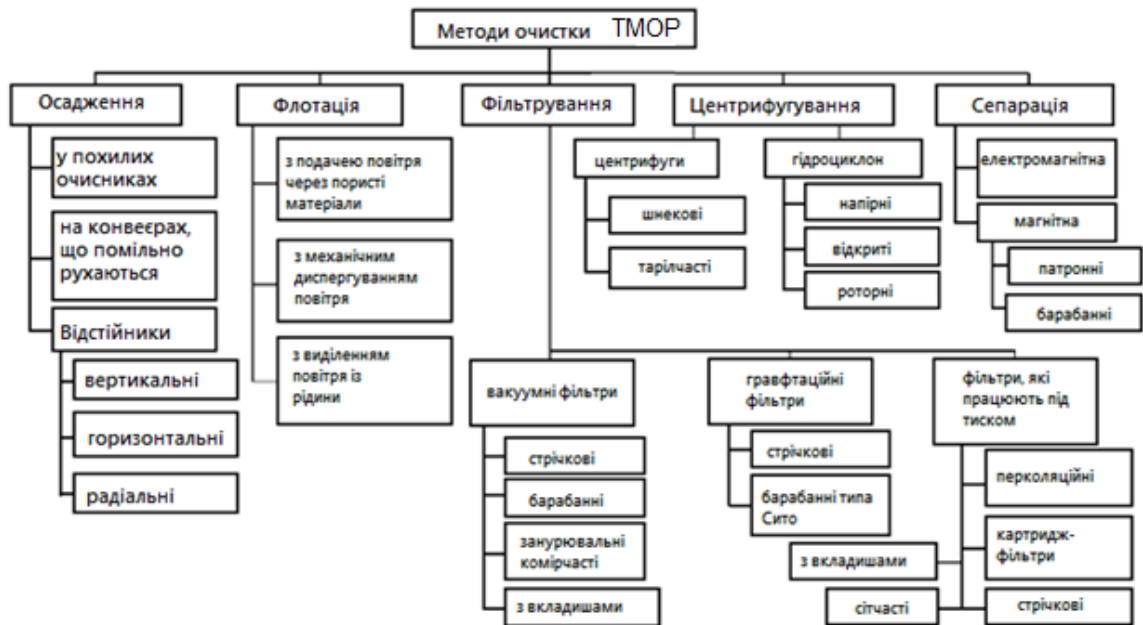


Рис. 1.1. Класифікація методів очищення ТМОР

Процес центрифугування характеризується рядом ключових технологічних параметрів, які визначають кінетику процесу: це фактор розділення, тобто. величина, що характеризує інтенсивність відцентрового поля, швидкість центрифугування, а також ступінь (чи продуктивність) очищення.

Висновки по розділу

Сепарація технологічних рідин є з технічної точки зору досить широке поняття, що вимагає додаткового уточнення в залежності від параметрів технологічного процесу. Для очищення ТМОР в ремонтно-обслуговуючих підприємствах сільського господарства характерно застосування сепарації за магнітними властивостями компонент середовища, при цьому класифікація різновидів даного методу проводиться в залежності від конструктивних особливостей устаткування, що використовується, точніше від способу отримання магнітного поля. За характером технологічного процесу установки сепарації поділяються на циклічні та безперервні дії.

До основних показників ефективності технологічного процесу відносяться швидкість, ступінь очищення та продуктивність обладнання.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЛАБОРАТОРНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

З метою вивчення процесу очищення технологічних рідин в електромагнітному полі в лабораторії кафедри «електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології» Поліського національного університету було розроблено та виготовлено експериментально-лабораторну установку електромагнітного сепаратора (рис. 2.1).

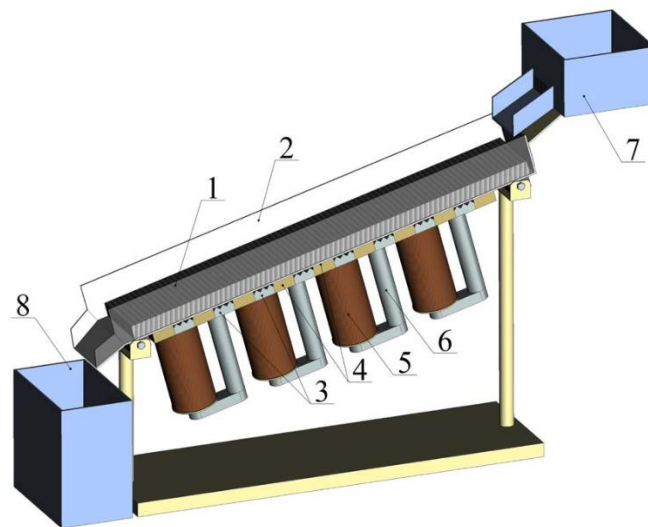


Рис. 2.1. Електромагнітний сепаратор

Поздовжній та поперечний розрізи електромагнітного сепаратора представлені на рис. 2 та 3.

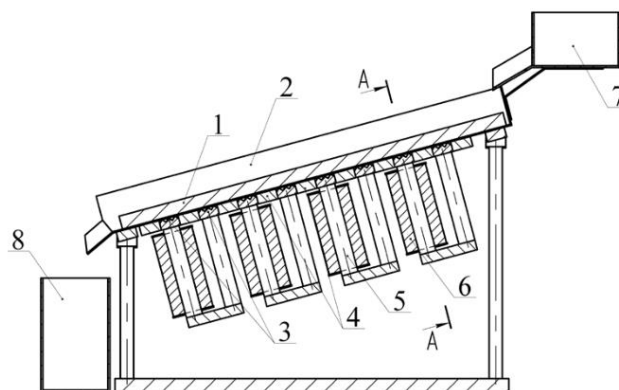


Рис. 2.2. Поздовжній розріз електромагнітного сепаратора

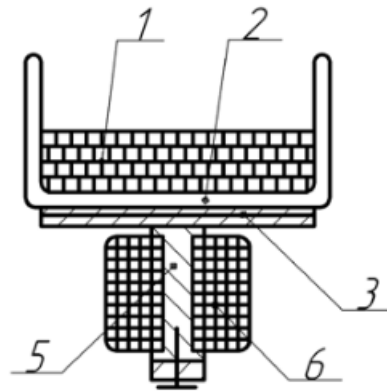


Рис. 2.3. Розріз А-А електромагнітного сепаратора

Електромагнітний сепаратор складається з основи та опорних стійок, на яких встановлена похила магнітна система, що змінює кут нахилу від 0 до 45° , що містить загальний концентратор магнітного поля 1 (рис. 2.4), кілька П-подібних магнітопроводів. На нижній частині робочого каналу 2, виконаного з немагнітного матеріалу (нержавіюча сталь, композитний матеріал та ін.), закріплені полюсні наконечники 3, виконані у формі зигзагу на верхній поверхні, розділені немагнітними вставками 4. Полюсні наконечники дозволяють 3 створити неоднорідне високоградієнтне магнітне поле з спрямованою магнітною силою. На полюсному наконечнику 3 закріплені сердечники 5, на яких розташовані котушки, що намагнічують 6. Магнітний потік замикається концентратором магнітного поля 1. У верхній частині електромагнітного сепаратора розташовується завантажувальний пристрій 7, а нижній частині приймач 8.

У робочому каналі міститься концентратор магнітного поля 1, геометрична форма якого відповідає прямокутній формі робочого каналу 2.



Рис. 2.4. Концентратор магнітного поля

Електромагнітний сепаратор працює в такий спосіб.

При подачі постійної напруги на котушки 6 П-подібних електромагнітів на концентраторі магнітного поля 1 за рахунок полюсних наконечників 3 створюється високоградієнтне неоднорідне магнітне поле з високим значенням магнітної індукції і зона сепарації пронизується по всій довжині і ширині робочого каналу 2 магнітним потоком. Технологічна рідина подається в зону сепарації і протікає рівномірним шаром концентратора магнітного поля 1. У зоні сепарації металеві частинки притягуються до полюса в напрямку збіжності магнітних силових ліній і осідають на концентраторі магнітного поля 1. Очищена рідина надходить у приймач 8. Очищення концентратора магнітного поля від металевих частинок здійснюють шляхом змивання частинок водою після сепарації. Подання технологічних рідин регулюється вентилем, встановленим на завантажувальному пристрої.

Під час розробки лабораторно-експериментальної установки виконувались такі умови:

- простота та оригінальність установки;
- зручність в експлуатації та обслуговуванні;
- стабільність режимів роботи;
- можливість регулювання конструктивних та технологічних параметрів;
- можливість спостереження за процесом сепарації.

Робочий канал виконаний з немагнітного матеріалу з такими розмірами: довжина 450 мм, ширина 100 мм та товщиною стінок 3 мм.

Електромагніти виконані зі сталі М32, діаметр сердечників 12 мм, довжина 135 мм. Полюсні наконечники (рис. 2.5.) мають такі розміри: довжина 100 мм, ширина 30 мм та товщина 10 мм, глибина зигзагу 5 мм.

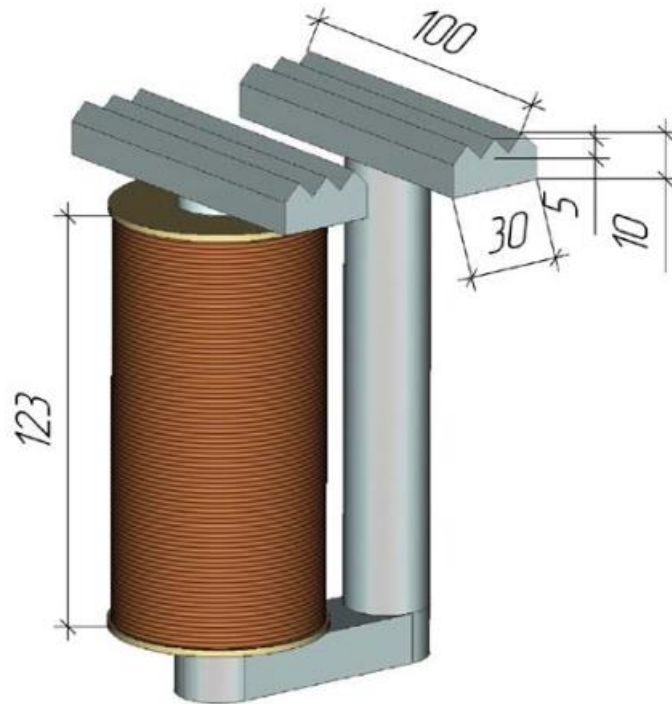


Рис. 2.5. Електромагніт із полюсними наконечниками

Котушки намагнічування виконані з обмотувального мідного дроту. ПТВ діаметром 0,4 мм. Розміри котушки: $h_{\text{обм}}=123$ мм; $r_{\text{зовніш}}=31$ мм; $r_{\text{серед}}=13$ мм.

Методика дослідження ефективності електромагнітного очищення технологічних мастильно-охолоджуючих рідин

Обробка результатів експериментальних досліджень із очищення ТМОР від металевих частинок проводилася в Уральському регіональному центрі технічної експертизи та діагностики.

Метод експериментального визначення концентрації металевих частинок включає вибір проби, її очищення через попередньо зважений паперовий фільтр, сушку фільтра і знаходження концентрації металевих домішок в ТМОР.

Використовувані контрольно-вимірювальні прилади:

- водоструминний насос із тиском не більше $1,33 \cdot 10^3$ Па;
- Сушильна шафа з температурою нагрівання 105 ± 2 °С;
- аналітичні ваги GH 300 з похибкою не більше ніж 0,0002 г;
- лабораторний скляний посуд та обладнання:
- бокс для зважування;

- склянки В1-200ТС;
- лійка В56-80ХС;
- ексикатор 1-190;
- лійка Бюхнера;
- скляна паличка завдовжки 150-200 мм із оплавленим кінцем;
- беззольний паперовий фільтр марки «Синя стрічка»;
- термометр ТЛ-2.

Підготовка до експерименту

Перемішуємо вручну і добре струшуємо пробу ТМОР протягом 5-7 хв. Місткість заповнюється на $\frac{3}{4}$. Паперовий фільтр та бокс для зважування обробляють дистильованою водою.



Рис. 2.6. Паперовий фільтр



Рис. 2.7. Бокс для зважування

Охолоджуємо в ексикаторі протягом 30 хв бокс для зважування і фільтр.



а

а) вид зверху;



б

б) вид збоку

Рис. 2.8. Ексікатор 1-190

Потім зважуємо (рис. 2.9) при допустимій похибці трохи більше 0,0002р.

Висушуємо і зважуємо бокс з фільтром до тих пір, поки розбіжності між двома послідовними зважування будуть не більше 0,0004 р.

Подальші висушування фільтра робимо протягом 30 хв.



Рис. 2.9. - Ваги аналітичні GH 300

Проведення експерименту

Пробу ТМОР у мірній склянці об'ємом 100 мл перемішують скляною паличкою та поступово наливають на паперовий фільтр, розташований у вирві.

За допомогою гумової пробки приєднують до колби вирву для фільтрування під вакуумом, з'єднаною з насосом. Змочуємо водою паперовий фільтр і ставимо у вирву так, щоб фільтр щільно прилягав до стінок вирви (рис. 2.10).

Залишки твердих домішок на стінках склянки видаляємо скляною паличкою і змиваємо на фільтр. Потім промиваємо двічі дистильованою водою склянку з-під проби ТМОР. Дистильовану воду очищаємо через фільтр.

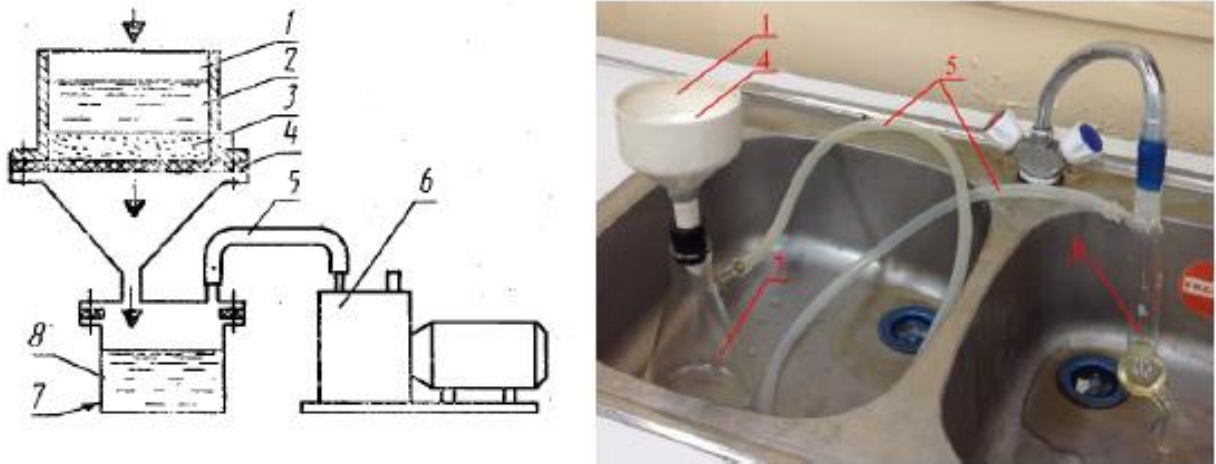


Рис. 2.10 – Схема установки для вакуумного фільтрування ТМОР: 1 – вакуум-фільтр; 2 – стовп забрудненої ТМОР над шаром осаду; 3 – шар осаду; 4 – паперовий фільтр; 5 – повітропровід; 6 – вакуум – насос; 7 - ємність для чистої ТМОР; 8 – чиста ТМОР

Розчин наливаємо у вирву не більше $\frac{3}{4}$ висоти фільтра. Наступну порцію наливаємо лише тоді, коли вирва майже звільнилася від рідини.

Після фільтрування фільтр разом з осадом зважують у боксі з відкритою кришкою та сушать у сушильній шафі (рис. 2.11) при температурі 105 ± 2 °C не менше 45 хв. Потім бокс для зважування закривають кришкою та охолоджують в ексікаторі протягом 30 хв і зважують з похибкою не більше 0,0002 г.

Далі висушуємо і зважуємо бокс для зважування з фільтром доти, поки розбіжність між двома послідовними зважуваннями будуть не більше 0,0004 г. Повторні висушування фільтра так само, як і наступні проводять протягом 30 хв.

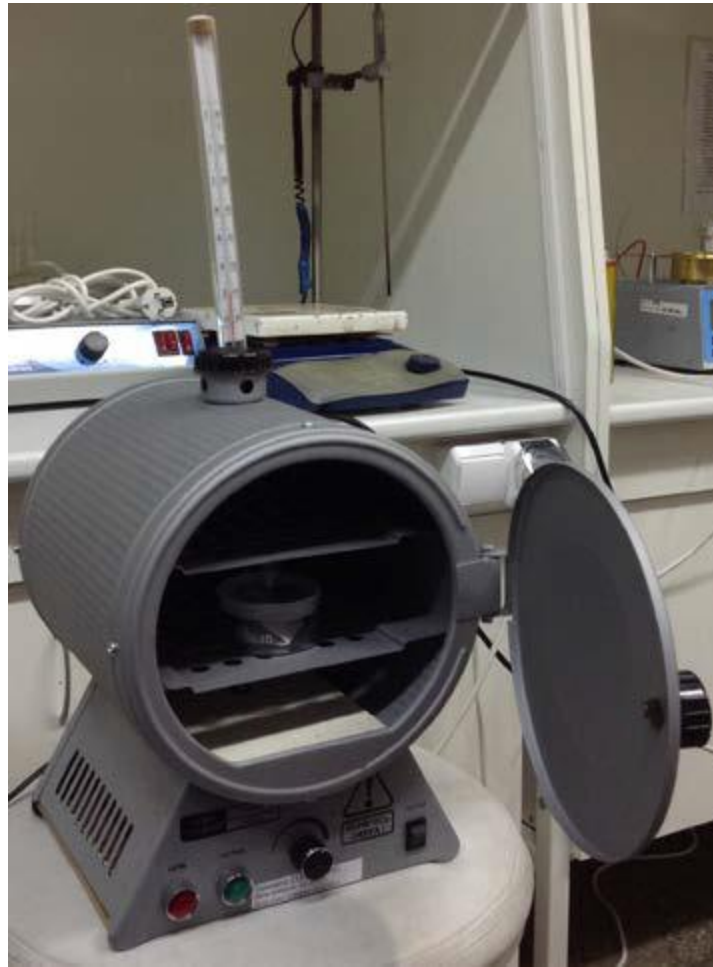


Рис. 2.11. Шафа сушильна та термометр ТЛ-2

Показники ефективності системи очищення ТМОР

1 Продуктивність Q , м³/год.

2 Масова частка металевих домішок до і після проходження ТМОР через магнітну систему. Ступінь ε очищення (у %) обчислюється за такою формулою:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{C_o}{C_n}\right) \cdot 100, \quad (2.1)$$

де C_o і C_n - концентрація металевих домішок, відповідно, в очищеній і неочищеній ТМОР.

3 Щільність металевих домішок ρ , г/см³.

4 Споживана потужність N , кВт · год/м³.

5 Економічні показники.

Вимоги до чистоти ТМОР при їх експлуатації

1 Компоненти для водозмішувальних ТМОР повинні виготовлятися відповідно до ГОСТ 1510 – 84

2 При заливанні ТМОР у циркуляційну систему застосування повинні бути забезпечені умови, що унеможливають потрапляння забруднень на стадії підготовки.

3 Під час експлуатації показники концентрації забруднень повинні вказуватись у нормативній документації у процесі виготовлення деталей.

4 Взяття проб для аналізу концентрації ступеня забруднення ТМОР відбувається після її відстою у баку.

5 Ефективність систем очищення характеризується показниками.

6 Гранично допустимі значення концентрацій металевих частинок, що містилися у ТМОР під час експлуатації, наведено у таблиці 2.1.

7 Допустимі значення чистоти ТМОР, що застосовуються в індивідуальних та централізованих системах застосування, визначають операцією, при обробці якої використовується ТМОР з більш високим показником чистоти.

8 Нормативні показники чистоти відпрацьованих ТМОР, які здаються на підприємства утилізації ТМОР, повинні відповідати вимогам ДСТУ 21046.

9 Забруднені ТМОР приймаються партіями та супроводжуються документом про якість.

Таблиця 2.1 – Граничні значення показників чистоти ТМОР у процесі експлуатації

Вид механічної обробки	Показники чистоти ТМОР (С), г/л
1 Кругле зовнішнє шліфування:	
- попереднє	0,41
- остаточне	0,11

Продовження таблиці 2.1

2 Плоске шліфування: - попереднє - остаточне	0,31 0,03
3 Точіння: - попереднє - остаточне	0,51 0,29
4 Свердління	0,39
5 Різання	0,49
6 Зінкування	0,29
7 Розгортання	0,09

Висновки по розділу

В другому розділі магістерської роботи на тему «Розробка електромагнітного сепаратора для очистки технологічних рідин металообробних станків ремонтних підприємств в АПК» розроблено методику проведення досліджень та представлено обладнання, яке використовувалося під час досліджень.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Перш ніж були проведені експерименти, виявили нульові значення факторів: напруга, розмір комірки та діаметр дроту концентратора, які впливають на оптимізацію.

Застосовуючи задані параметри, ми призначили експерименти, що дозволяють точно судити про рівень впливу кожного фактора на магнітну індукцію, що розвивається в електромагнітному сепараторі.

Спочатку здійснено повний факторний експеримент 2^3 , який складається з 8 дослідів (таблиця 3.2, досліди 1...8). Досліди не повторюються, але для оцінки дисперсії досліди в центрі плану основного рівня повторили 6 разів (таблиця 3.2, досліди 15...20). З урахуванням можливого початку планування другого порядку обрали число дублів центрального дослідів для побудови поліноміальної моделі [13]. Щойно було побудовано модель другого порядку, проводимо досліди у зоряних струмах. Зіркове плече у плані $\alpha = \pm 1,682$ (таблиця 3.1).

Внаслідок проведення дослідів на основному рівні за формулою (3.1) знайдемо дисперсію відтворюваності. Вийшло, що $S_y^2=0,3937$ середньоквадратична помилка дослідів $S_y = 0,6275$ при $f_I = 5$.

За результатами дослідів плану 2^3 розраховали за формулою такі коефіцієнти регресії:

$$b_0 = 31,25; b_1 = 3,63; b_2 = 4,95; b_3 = 2,33;$$

$$b_{12} = 0,13; b_{13} = -0,33; b_{23} = -0,2; b_{123} = -0,475;$$

За формулою розраховали дисперсію дослідів щодо цих коефіцієнтів, $S^2_{bi} = 0,0492$, середньоквадратичні помилки цих коефіцієнтів $S_{bi} = 0,2218$. Якщо рівень значущості $\alpha = 0,05$ і ступінь свободи $f_I = 5$, то табличне значення критерію Стюдента $t_{0,05;5} = 2,57$, отже, за формулою знаходимо довірчий інтервал $\Delta_{bi} = 2,57 \cdot 0,2218 = 0,57$. Порівнюємо значення коефіцієнтів та знайдене

значення довірчого інтервалу за формулою. Проаналізувавши результат, з'ясуємо, що статистично незначущими є коефіцієнти: $b_{12}b_{13}b_{23}b_{123}$.

Таблиця 3.1 – Допоміжна таблиця для розрахунку дисперсії досліду у центрі плану

Номер досліду u	$Y_{i \text{ екс}}$	$Y_{i \text{ розч}}$	Δy	Δy^2
15	32,2	33,03	0,09	0,005
16	32,6		0,53	0,271
17	32,2		0,91	0,845
18	33,6		0,47	0,231
19	33,2		0,09	0,005
20	33,9		0,77	0,607

Перевірку адекватності лінійної частини одержаного рівняння робили за t -критерієм. Спочатку оцінили різницю між b_0 і середнім результатом досліду у центрі плану. В даному випадку $\bar{y}_0 = 33,02$; $b_0 = 31,25$; $S_y = 0,6275$; $N = 8$. Використовуючи формулу, отримаємо $t^{\text{розр}} = \frac{(31,25 - 33,02) \cdot \sqrt{8}}{0,6275} = 7,98$, значення перевищує табличне. Виходить, що лінійна частина поліноміальної моделі є неадекватною. В результаті було вирішено зробити поліноміальну модель другого порядку, для цього перейдемо до центрального композиційного рототабельного уніформ-плану другого порядку. Залишилося реалізувати досліди у зоряних точках (таблиця досліди 9...14). Досліди ядра плану 2^3 і в центрі плану були вже виконані.

Знаходження коефіцієнтів визначаємо за такою формулою (3.11). Допоміжні константи $c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 c_6$ вибираємо з таблиць [8].

$$\begin{aligned}
b_0 &= 0,16635 \cdot 599,2 - 0,0568 \cdot 1177,613 = 32,7885; \\
b_1 &= 0,07322 \cdot 81,983 = 6,0028; \quad b_2 = 0,0732 \cdot 37,682 = 2,7591; \\
b_3 &= 0,07322 \cdot 12,745 = 0,9332; \quad b_{12} = 0,125 \cdot 1,0 = 0,125; \\
b_{13} &= 0,125 \cdot (-2,6) = -0,325; \quad b_{23} = 0,125 \cdot (-1,6) = -0,2; \\
b_{11} &= 0,0625 \cdot 431,403 + 0,00689 \cdot 1177,613 - 0,0568 \cdot 599,2 = 1,0419; \\
b_{22} &= 0,0625 \cdot 375,086 + 0,00689 \cdot 1177,613 - 0,0568 \cdot 599,2 = -2,4779; \\
b_{33} &= 0,0625 \cdot 371,124 + 0,00689 \cdot 1177,613 - 0,0568 \cdot 599,2 = -2,7255.
\end{aligned}$$

За формулою визначаємо дисперсії, середньоквадратичні помилки та підступи. Допоміжні константи c_7 c_8 c_9 c_{10} перебувають у таблиці

$$\begin{aligned}
S_{b_0}^2 &= 0,16635 \cdot 0,3937 = 0,0655; \quad S_{b_0} = 0,40786 \cdot 0,6275 = 0,2559; \\
S_{b_1}^2 &= 0,07322 \cdot 0,3937 = 0,0288; \quad S_{b_1} = 0,27059 \cdot 0,6275 = 0,1698; \\
S_{b_2}^2 &= S_{b_3}^2 = S_{b_4}^2; \quad S_{b_2} = S_{b_3} = S_{b_4}; \\
S_{b_{12}}^2 &= 0,125 \cdot 0,3937 = 0,0492; \quad S_{b_{12}} = 0,35355 \cdot 0,6275 = 0,2219; \\
S_{b_{11}}^2 &= S_{b_{22}}^2 = S_{b_{33}}^2; \quad S_{b_{11}} = S_{b_{22}} = S_{b_{33}}; \\
S_{b_{11}}^2 &= 0,06939 \cdot 0,3937 = 0,0273; \quad S_{b_{11}} = 0,26342 \cdot 0,6275 = 0,1653; \\
\text{cov}_{b_0, b_1} &= -0,0568 \cdot 0,3937 = -0,0224; \\
\text{cov}_{b_0, b_2} &= 0,00689 \cdot 0,3937 = 0,0027.
\end{aligned}$$

Розраховуємо довірчий інтервал за формулою для порівняння абсолютного значення, при цьому t-критерій Стьюдента брали з таблиць за ступенем свободи $f_1 = 5$ і $\alpha = 0,05$

$$\begin{aligned}
|\Delta_{b_0}| &= 2,57 \cdot 0,2559 = 0,6577; \quad \Delta_{b_1} = 2,57 \cdot 0,1698 = 0,4364; \\
\Delta_{b_{11}} &= 2,57 \cdot 0,1653 = 0,4248; \quad \Delta_{b_{12}} = 2,57 \cdot 0,2219 = 0,5703.
\end{aligned}$$

Усі коефіцієнти, крім b_{12} b_{13} b_{23} статистично значущі при 5%-му рівні.

В результаті поліноміальна модель другого порядку виглядатиме:

$$Y = 32,789 + 6,003x_1 + 2,759x_2 + 0,933x_3 + 1,042x_1^2 - 2,478x_2^2 - 2,726x_3^2.$$

За формулою перевіряємо адекватність поліноміальної моделі. Дисперсію неадекватності визначаємо за формулою, тому що досліди не дублювалися. У

таблиці є дані магнітної індукції. Оскільки поліноміальна модель має сім коефіцієнтів, то за формулою $f_2 = N - k' - 1$ визначаємо число ступенів свободи, k' – кількість факторів.

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{1,512}{12} = 0,126$$

З таблиці вибираємо табличне значення F - критерію, при цьому число ступенів свободи в знаменнику $f_1 = 5$ і чисельнику $f_2 = 12$ для рівня значимості $\alpha = 0,05$. Розрахункове значення $F^{\text{расч}} = 0,126/0,3937 = 0,32$, що менше табличного це говорить про адекватність отриманої поліноміальної моделі.

Таблиця 3.2 – Зіставлення експериментальних та розрахункових даних

Номер досліду u	$Y_i \text{ екс}$	$Y_i \text{ розч}$	Δy	Δy^2
1	41,3	38,322	2,978	8,869
2	35,4	26,316	9,084	82,519
3	32,5	32,804	0,304	0,092
4	25,2	20,798	4,402	19,378
5	38,6	36,456	2,144	4,597
6	29,5	24,45	5,05	25,503
7	27,1	30,938	3,838	14,730
8	20,4	18,932	1,468	2,155
9	47,8	45,835	1,965	3,861
10	16,3	25,641	9,341	87,254
11	21,5	30,417	8,917	79,513
12	22,7	21,135	1,565	2,449
13	19,6	26,643	7,043	49,604
14	23,2	23,505	0,305	0,093

Щоб побудувати поверхню відгуку, використовуємо програму STATISTICA.

На Рис. 3.1, 3.2, 3.3 представлені лінії рівня $B(x_1, x_2)$, $B(x_1, x_3)$, $B(x_2, x_3)$.

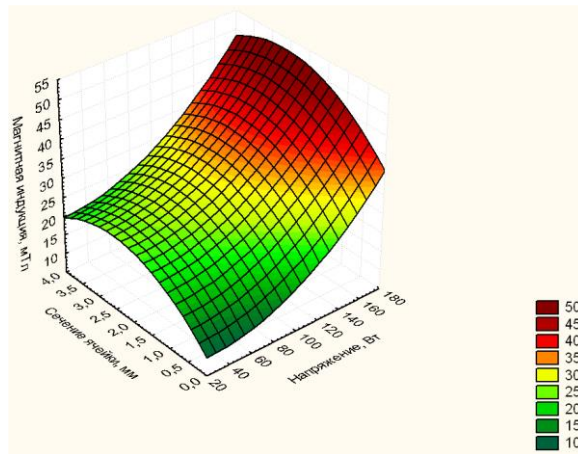


Рис. 3.1. Поверхня відгуку, що характеризує значення магнітної індукції залежно від напруги, що подається на котушки намагнічування, та розмір комірки концентратора

Аналіз поверхні відгуку при зміні магнітної індукції в залежності від напруги та розміру осередку показує, що при підвищенні напруги зростає і магнітна індукція: при $U = 60$ В, $B = 26$ мТл, при $U = 100$ В, $B = 45$ мТл, при розмірі осередку концентратора $l_1 = 2,0\text{--}3,0$ мм відповідно (рис. 3.2).

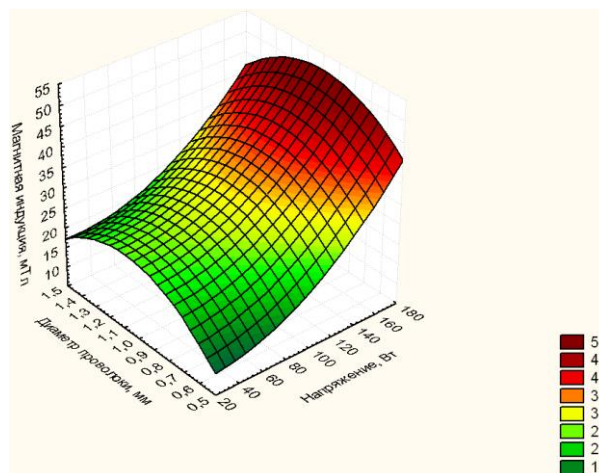


Рис. 3.2. Поверхня відгуку, що характеризує значення магнітної індукції залежно від напруги, що подається на котушки намагнічування, та діаметра дроту концентратора

Аналіз поверхні відгуку зміни магнітної індукції в залежності від напруги та діаметра дроту концентратора показує, що при підвищенні напруги зростає магнітна індукція: при $U = 60$ В, $B = 28$ мТл, при $U = 100$ В, $B = 48$ мТл і розміру діаметр дроту концентратора $d = 1,0\text{--}1,2$ мм (рис.3.3).

Аналіз поверхні відгуку показує, що параметрами, що дозволяють отримати максимальне значення магнітної індукції, є такі характеристики: розмір діаметра дроту концентратора $d = 1,0-1,2$ мм і розміру комірки концентратора $l_l = 2,0-3,0$ мм.

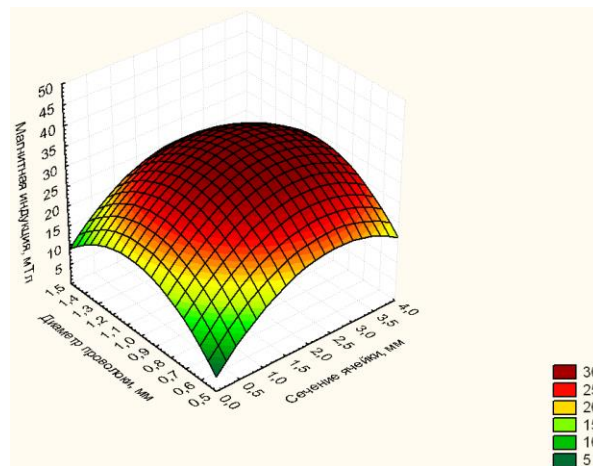


Рис. 3.3. Поверхня відгуку, що характеризує значення магнітної індукції залежно від розміру комірки та діаметра дроту концентратора

У цих умовах можна отримати максимальне значення індукції магнітного поля в робочому каналі сепаратора.

Результати експериментального визначення забруднення ТМОР.

Динаміку зміни фізико-хімічних параметрів проводили на водозмішувальній «10% емульсії Динол». У ході виконання експерименту контролювали весь комплекс основних параметрів ТМОР: зовнішній вигляд, запах, водний показник pH , щільність, температуру кристалізації $t_{кр}$, вміст металевих домішок.

Проаналізуємо результати експерименту: зовнішній вигляд – однорідна рідина жовтого кольору; запах – не дратівливий; температура кристалізації $t_{кр} = -4^{\circ}C$. Щільність та водневий показник з часом зменшуються в межах ГОСТ, а концентрація металевих домішок зі збільшенням часу роботи стрічкового верстата зростає (рис. 3.4)

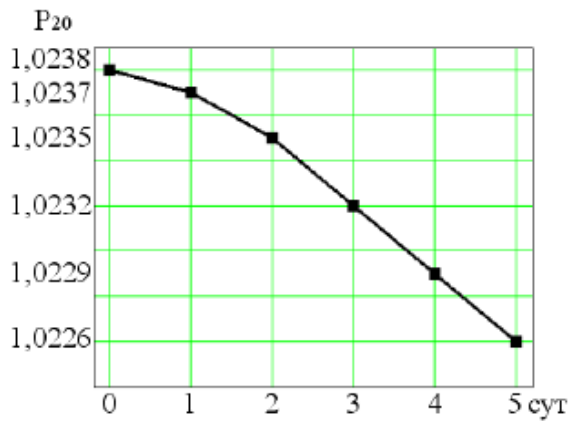


Рис. 3.4. Залежність зміни щільності від часу вироблення верстата



Рис. 3.5. Залежність зміни водневого показника pH від часу вироблення верстата

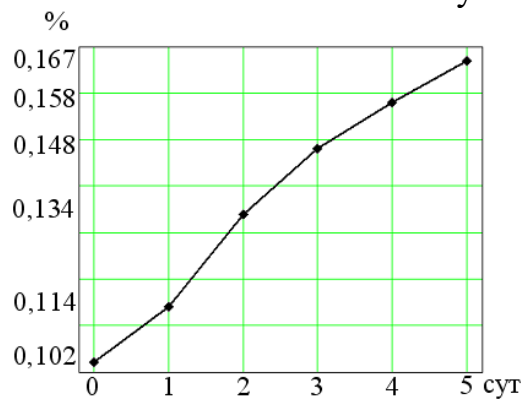


Рис. 3.6. Залежність зміни концентрації металевих частинок від часу вироблення верстата

Результати експериментів показують, що концентрація металевих частинок за 5 діб роботи стрічкового верстата збільшилася з 0,102 до 0,167%. Значний вплив мають металеві частинки, що впливають на показники якості обробки поверхні, а також на знос ріжучого інструменту.

Концентрація металевих домішок до і після проходження ТМОР через магнітну систему визначається за методикою, описаною вище. Ступінь очистки ε (в %) обчислюється за формулою.

Таблиця 3.3 – Експериментальні дані ступеня очищення ТМОР

Назва показника	До очистки	Після очистки	Ступінь очистки, %
Масова доля металевих частинок, г/л			
Проба № 1	0,1578	0,0238	85,7
Проба № 2	0,1438	0,0467	72,8
Проба № 3	0,1678	0,0136	92,6

Відповідно до ДСТУ, концентрація металевих домішок для водозмішуючих ТМОР залежить від технологічного процесу обробки деталі. Гранично допустимі показники частоти ТМОР наведено у таблиці 3.4.

Аналіз експерименту показує, що електромагнітний сепаратор забезпечує ефективний ступінь очищення ТМОР від металевих частинок, ефективність очищення досягає 90%.

Результати дослідження теплового режиму котушок намагнічування електромагнітного сепаратора.

В результаті послідовного з'єднання котушок намагнічування і напруги 220 був виконаний розрахунок.

Для цього використовувалися параметри: геометричні розміри котушки: $h_{обм} = 123$ мм; $r_{зовниш} = 31$ мм; $r_{внутр} = 13$ мм; опір котушки намагнічування при температурі 20 °С: $R_{20} = 238$ Ом; температурний коефіцієнт опору (для міді): $\alpha = 4 \cdot 10^{-3}$ 1/°С.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку теплового режиму котушок намагнічування

Напруга живлення котушки намагнічування U, В	Випрямлена напруга U, В	$V_{обм},$ см ³	$t_p,$ °С	$R_t,$ Ом	U, Вт	P, Вт	$P_{об},$ Вт/см ³
220	199	307	26	242,77	49,6	10,2	0,034

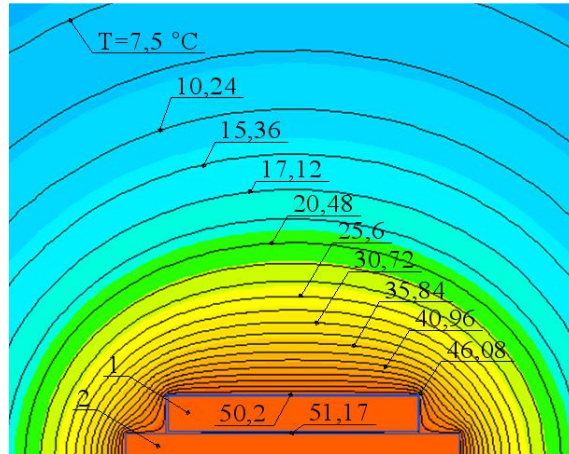


Рис. 3.7. Ізотерми стаціонарного теплового поля: 1 – котушка намагнічування; 2 – сердечник

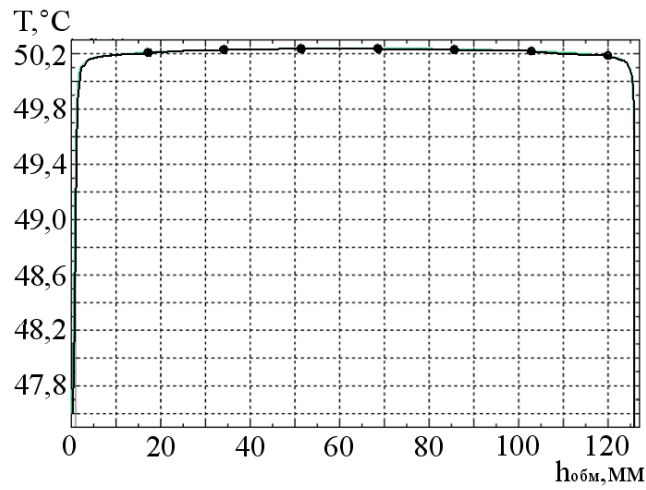


Рис.3.8. Розподіл температури на зовнішній поверхні обмотки вздовж осі

x_1

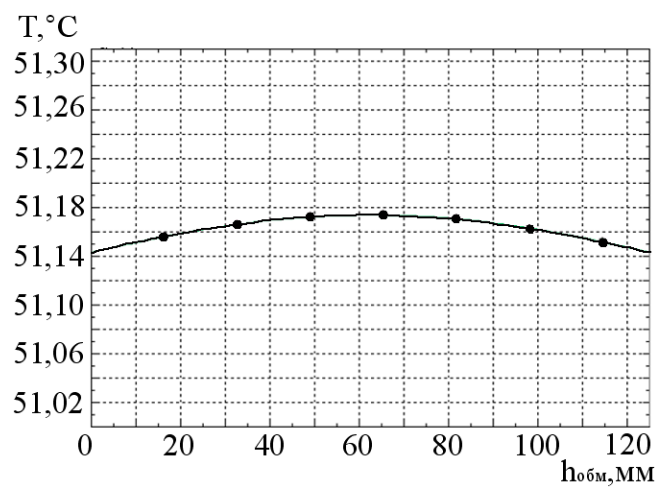


Рис.3.9. Розподіл температури на внутрішній поверхні обмотки вздовж осі x_2

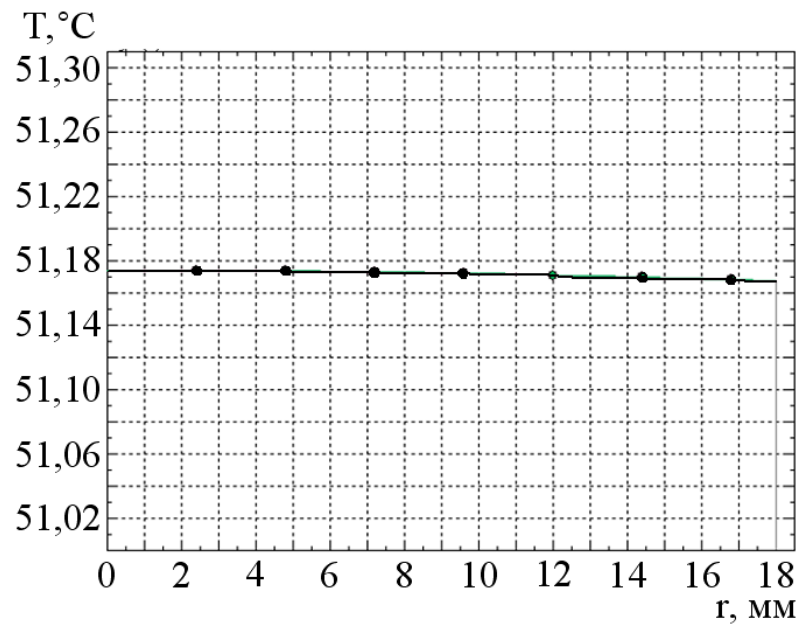


Рис.3.10. Розподіл температури за радіусом по центру котушки намагнічування

Таблиця 3.5 – Максимальне значення температури, °C

Вид з'єднання котушок намагнічування	Напруга живлення U, В	Випрямлена напруга U, В	На зовнішній поверхні обмотки	На внутрішній поверхні обмотки	Різниця температур на котушки
Послідовне	220	197	50,3	51,18	0,99

Розподіл температури нагріву обмотувального дроту показано малюнку. Теплота, що виділяється в обмотувальному дроті, поширюється не тільки на активні елементи електромагнітного сепаратора, а й у навколишній простір.

Рисунки показують зміну розподілу температури на зовнішній та внутрішній поверхні котушки намагнічування при тривалому режимі роботи. Якщо температура досягає постійного значення, сепаратор при цій температурі залишається під навантаженням тривалий час. По центру довжини ($h_{обм}$) котушки розташовується сама частина обмотки, що нагрівається. Що далі від центру, то менше температура. Рис. 3.11 показує зміну температури по радіусу, напрямком йде від внутрішньої поверхні котушки до зовнішньої.

У табл. 3.6 показані результати експериментальних вимірів котушки намагнічування.

Таблиця 3.6 – Експериментальні дані теплового режиму котушки намагнічування

Час t, ч	T _к , °C	Δt = T _к - T _{окр. ср.} , °C	Час t, ч	T _к , °C	Δt = T _к - T _{окр. ср.} , °C
0	20	0	2,75	44	24
0,25	23	3	3	45	25
0,5	25	5	3,25	46,5	26,5
0,75	28	8	3,5	48	28
1	30	10	3,75	49	29
1,25	33	13	4	50	30
1,5	36	16	4,25	50,5	30,5
1,75	38	18	4,5	51	31
2	39,5	19,5	4,75	51	31
2,25	41	21	5	51	31
2,5	42,5	22,5			

Зі зростанням температури котушки збільшується різниця температур і відбувається інтенсивна віддача тепла в навколишній простір. Значить, настане момент, коли кількість теплоти, що виділяється і віддається, в простір зрівняються, тоді настає постійний режим, температура припиняє зростати.

Криві зміни підвищення температури котушки намагнічування показані малюнку. На початку експерименту швидкість нагрівання котушки намагнічування велика, тому крива температури різко йде вгору, потім швидкість сповільнюється, і через деякий час зростання температури припиняється.

При порівнянні отриманих результатів розрахунку температурних полів бачимо, що для електромагнітного сепаратора даний вид з'єднання котушок намагнічування буде оптимальним з напругою 220 В. Таким чином, ізоляція котушки намагнічування при класі нагрівостійкості E Q_{нагр} = (120 °C) витримує допустимі результати розрахункових даних t_{внутр} = 51,17 °C, t_{зовніш} = 50,2 °C, експериментальне значення T_к = 51 °C.

Температура нагрівання перевищить температуру, що допускається для ізоляції, якщо напруга довести до 380 В і включити котушку намагнічування на тривалий час.

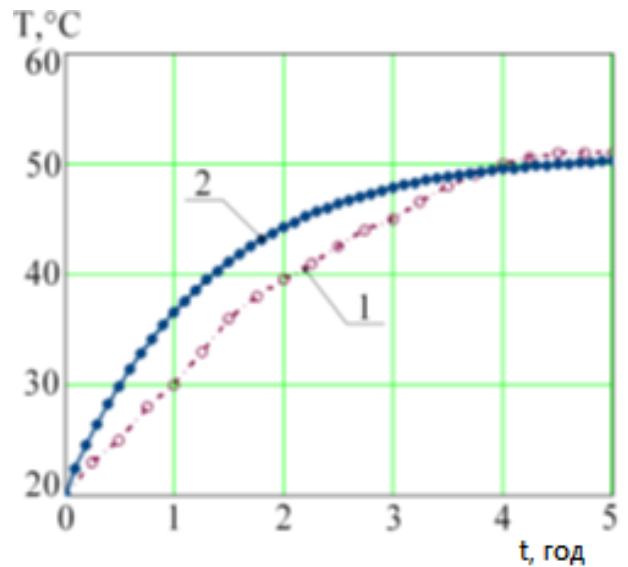


Рис. 3.11. Порівняння результатів теплового розрахунку котушок намагнічування: 1 – експеримент; 2 – теоретична (розрахункова)

У малогабаритному електромагнітному сепараторі котушки намагнічування не вимагають особливих охолоджуючих пристроїв, відведення теплових потоків відбувається шляхом зіткнення нагрітих поверхонь намагнічування котушок з навколишнім простором і відповідають вимогам нормативної документації.

Висновки по розділу.

Результат розрахунку температурних полів показує, що для електромагнітного сепаратора гранично допустиме перевищення температури ізоляції котушки намагнічування при класі нагрівальності E ($t_{нагр} = 120$ °C) витримує температуру нагріву $t_{внутр} = 51,2$ °C, яка відповідає отриманому експериментальному значенню $T_k = 51$ °C. Малогабаритний електромагнітний сепаратор не вимагає спеціальних охолоджувальних пристроїв: відведення теплових потоків відбувається шляхом дотику нагрітих поверхонь намагнічування котушок з навколишнім простором і відповідає вимогам нормативної документації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання, що полягає в обґрунтуванні та розробці електромагнітного сепаратора, що забезпечує якісне очищення від металевих домішок за рахунок використання пропонованого сітчастого концентратора магнітного поля. На підставі результатів виконаних теоретичних та експериментальних досліджень можна зробити наступний

Розроблено конструктивне нове технічне засіб – сітчастий концентратор неоднорідного магнітного поля, що забезпечує підвищення магнітної індукції робочому каналі сепаратора на 57 %. Встановлені оптимальні параметри концентратора (діаметр сітки 1 мм і розмір комірки 3 мм) забезпечують максимальні значення магнітної індукції при величині напруги 220 В.

Запропонована конструкція електромагнітного сепаратора для очищення рідин забезпечує очищення технологічної рідини від металевих частинок до 90 %, що відповідає ДСТУ при продуктивності установки до 100-120 л/год.

Результат розрахунку температурних полів показує, що для електромагнітного сепаратора гранично допустиме перевищення температури ізоляції котушки намагнічування при класі нагрівальності E ($t_{нагр} = 120$ °С) витримує температуру нагріву $t_{внутр} = 51,2$ °С, яка відповідає отриманому експериментальному значенню $T_k = 51$ °С. Малогабаритний електромагнітний сепаратор не вимагає спеціальних охолоджувальних пристроїв: відведення теплових потоків відбувається шляхом дотику нагрітих поверхонь намагнічування катушок з навколишнім простором і відповідає вимогам нормативної документації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Палійчук В. К., Левандовський О. М. Розробка експериментально-лабораторної моделі електромагнітного сепаратор. *Наукові читання–2022: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 7 червня 2022 р. Житомир: Поліський національний університет, 2022. С. 18-21.*
2. Палійчук В. К., Левандовський О. М. Аналіз існуючих методів та установок для очищення технологічних рідин. *Збірник тез доповідей XXIII Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (16–18 жовтня 2022 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Київ. Житомир. 2022.С. 315-317.*
3. Левандовський О. М. Розробка експериментально-лабораторної моделі електромагнітного сепаратора. *Збірник тез VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» 31 березня 2021 року, м. Житомир. С. 273-274.*
4. Балюта С.М., Куєвда В.П., Юхно М.І., Данилюк В.О., Куєвда Ю.В., Литвин І.Ю., Мащенко О.А. Електромагнітний сепаратор барабанного типу для очищення цукру-піску від феромагнітних домішок. *Наукові праці НУХТ 2014. Том 20. № 6. С. 142-147.*
5. Загирняк М. В. Бранспиз Ю. А., Шведчикова И. А. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: моногр. Киев : Техніка, 2011. 224 с.
6. Svoboda J. *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*. Kluwer Academic Publishers. 2004. P. 99
7. Никитченко И. В., Gerlici J., Шведчикова И. А., Романченко Ю. А. Исследование влияния конфигурации магнитной системы сепаратора на

постоянных магнитах на распределение магнитного поля в рабочей зоне. Научно-практический журнал *Электротехника и электромеханика*. 2017. №2. С. 13-17.

8. Романченко Ю. А., Шведчикова И. А. Анализ структурного разнообразия полиградиентных магнитных сепараторов. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: збірник матеріалів конференції XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (Кременчук 10-11 квітня 2014 р.)*. Кременчук : КрНУ, 2014. С. 245-246

9. Загирняк М.В., Шведчикова И.А. Проблема систематизации магнитных сепараторов. *Технічна електродинаміка*. 2006. № 8. С. 91-94

10. Мелконова І.В. Порівняльний аналіз магнітосепаруючих систем остійних магнітах компанії GOUDSMIT MAGNETICS. Всеукраїнська науковопрактична інтернет конференції молодих учених та студентів «Електромеханічні та інформаційні системи». Київ: КНУТУ, 2020. С. 133-134.

11. Романченко Ю. А. Порівняльний аналіз програмних продуктів для розрахунку статичних магнітних полів. *Університетська наука. Проблеми міжнародної інтеграції: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції (Сєвєродонецьк, Люблін 3-5 травня 2017 р.)*. 2017. С. 22-24.

12. Романченко Ю. А. Шведчикова І. О. Методи пошуку оптимальних параметрів. *III Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Технічні науки в Україні: погляд у майбутнє» (Київ 27-28 квітня 2018 р.)*. С. 67-69.

13. Авдеев, Н. Е. Принципы построения модели идеального сепаратора Доклады ВАСХНИЛ. 1978. № 11. С. 214-217.

14. Андреева, Е. Г. Программа расчета магнитного поля системы открытого типа. *Навигатор в мире науки и образования*. 2012. № 4-7(20-23). С. 165-166.

15. Варнаков, В. В. Технологический сервис машин сельскохозяйственного назначения. Москва : Колос, 2000. 256 с.

16. Мелконова І.В., Шведчикова І. А., Мелконов Г.Л. Визначення розподілу силової функції в робочій зоні магнітного дискового сепаратора. Восточноевропейский журнал передовых технологий. 2019. Т. 5, №5 (101). С. 22–29.