e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

ENGINEERING DESIGN RATIONALE FOR A PNEUMATIC SAPROPEL CONVEYOR

S. Khomysh[1*], R. Panechko[2]

[1]Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
[2]Kovel Industrial and Economic Professional College, Kovel, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
sapropel,
transportation,
air,
pump,
diameter,
resistance,
pressure.

Article history:
Received 26.10.2026
Reviewed 28.10.2026
Approved 30.10.2026

[*]***Corresponding author:***
smhh@ukr.net

ABSTRACT

The article examines the limitations of existing technologies for extracting sapropel from underwater deposits. These technologies are found to be inefficient because they yield raw material unsuitable for agricultural applications and cause substantial environmental damage. Insufficient attention is paid to transporting the extracted material to the shoreline.

The equipment examined has drawbacks that adversely affect the quality of the recovered material. These limitations indicate the need for an improved sapropel transport process using airflow. This approach is intended to meet the quality requirements for sapropel used in agriculture while minimizing environmental risks.

Based on engineering considerations, a conceptual design is proposed for an improved machine for transporting freshly extracted organic sapropel from the extraction site to the shore. A design for its pneumatic conveying component, an air-jet pump, is also presented. Theoretical analysis is used to substantiate the pump's design and operating parameters.

The proposed machine is expected to significantly improve conveying efficiency and enable sapropel transport while maintaining the quality required for agricultural applications and avoiding damage to the aquatic environment.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2363

To cite this article:
Khomysh, S. & Panechko, R. (2026). Engineering design rationale for a pneumatic sapropel conveyor. *Agricultural Machines*, *52*, 275–282. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2363

e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

УДК 631.6: 626.8: 681.5

ІНЖЕНЕРНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПНЕВМАТИЧНОГО ТРАНСПОРТЕРА САПРОПЕЛЮ

С.М. Хомич[1], Р.В. Панечко[2]

[1]*Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна*
[2]*Ковельський промислово-економічний фаховий коледж, Ковель, Україна*

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
сапропель,
транспортування,
повітря,
насос,
діаметр,
опір,
тиск.

Історія публікації:
Отримано 26.10.2026
Прорецензовано 28.10.2026
Затверджено до друку 30.10.2026

Автор для листування:*
smhh@ukr.net

АНОТАЦІЯ

У матеріалах статті висвітлено проблематику, існуючих технологій отримання сапропелевої сировини з підводних родовищ. Встановлено малоефективнвсть їх використання, за рахунок добування непридатної сировини для АПК та значній шкоді навколишньому середовищу. Встановлено, що у сапропеледобувних технологіях досить мала увага звертається на переміщення сировини до берегової лінії.

Проаналізовані засоби мають негативні фактори, які впивають на якість отриманого матеріалу. На основі недоліків, зазначено доцільність застосування оновленого процесу переміщенні сапропелю, за рахунок використанням повітряних потоків. Відповідно застосування такої технології буде задовольняти вимоги висунуті до отриманої сапропелевої сировини, яка призначений для АПК та мінімізувати екологічні небезпеки.

Згідно інженерних міркувань, запропонована схема удосконаленої машини для переміщення свіжодобутих покладів органічного сапропелю від місця добування до берегової частини та схема пневматичного робочого органу – повітреструменевого насоса, а також проведені теоретичні обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів останнього.

Удосконалена машина значно підвищить ефективність виконання робочого процесу, дозволить якісно виконувати переміщення (трансаортування) сапропелевої сировини із збереженням вимог для застосування її в АПК та не завдаватиме шкоди акваторії водного об'єкта.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2363

Цитувати цю статтю:
Хомич, С. М. & Панечко, Р. В. (2026). Інженерне обґрунтування пневматичного транспортера сапропелю. *Сільськогосподарські машини*, *52*, 275–282. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2363

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Всім відомо, що достатньо великою сировинною базою для ведення органного землеробства є добрива на основі сапропелю. Саме такі добрива з органічної сапропелевої сировини, набувають популярності і є перспективні адже у зв'язку із зменшенням ресурсів органічних добрив тваринного походження, та постійним підвищенням цін на мінеральні попит на альтернативні значно підвищується *(Шевчук 1996*, *Дем'янюк 2022, Кузнєцова 1992).*

На сьогодні очищення озер від багаторічних відкладень є дуже важливим завданням, оскільки воно допомагає відновити прісноводна водойми від замулення та водночас забезпечує аграрний сектор цінною органічною сировиною *(Дем'янюк 2022, Кузнєцова 1992, Хомич 2017).*

Аналіз літературних джерел свідчить, що технологій видобутку сапропелю для потреб сільського господарства існує небагато. Кожна з них є специфічною, індивідуальною та розробленою під конкретну водойму. Водночас інформації про транспортування видобутої сировини з води до берега недостатньо; зазвичай для цього застосовують стандартну техніку, яку використовують у водному господарстві. *(Хомич 2017, Булік 2005*, *Гідробудівельник).*

Оскільки високоорганічний сапропель, призначений для виробництва добрив, є дуже в'язким і чутливим до змін структури та вологості, його транспортування на суходіл суттєво відрізняється від доставки цієї сировини іншого призначення. Через це проектування спеціального обладнання, яке забезпечить збереження ключових властивостей речовини під час переміщення, є надзвичайно важливим завданням.

Одним з найбільш дешевих способів розробки родовищ та переміщення сапропелів є гідравлічний та гідромеханізований, з використанням плавзасобів та земснарядів *(Хомич 2014)*. Дані машини дозволяють проводити екскавацію покладів по трубах за допомогою прокачування насосами добутої пульпи, до місця складування.

Цей спосіб є досить небезпечний, з точки зору екології, оскільки потребує створення фільтраційних майданчиків, наявності великих водойм, а також постійного моніторингу стану місцевої флори та фауни. Крім того, транспортування видобутої суміші до берега є енергоємним процесом, який, залежно від довжини трубопроводу, вимагає використання потужного насосного обладнання. Складування отриманої пульпи також потребує значних площ, що часто призводить до вирубування прибережних лісонасаджень або спорудження штучних дамб, збільшуючи обсяги додаткових робіт.

З огляду на це, така технологія є неприйнятною для видобутку сапропелю для потреб агропромислового комплексу, оскільки кінцева сировина не відповідає встановленим стандартам якості.

Також переміщення сапропелю (доставку до берега) виконують баржою *(Хлопецький 2016)*. Такий процес є досить енергозатратний, оскільки потребує велику кількість перевантажувальних робіт.

Також існує технічне рішення, яке зосереджене на застосуванні канатно-скреперної установки *(Булік 2005),* що одночасно добуває і транспортує сапропель до берега.

Недоліками є те, що в процесі добування звбірний пристрій скрепера значно збовтує місце розробки родовища, нерівномірно проводить розробку шарів покладів, а в процесі транспортування (переміщення до берега у повітрі) забруднює водне середовище вздовж повітряної траси. Також машина працює у циклічному режимі, що значно знижує продуктивність.

Щодо складування покладів то у даному випадку недоліки аналогічні попередньому аналогу.

Мета дослідження – розробка конструкції та інженерне обґрунтування трубопровідної системи транспортування органічного сапропелю для потреб агропромислового комплексу із забезпеченням збереження його якісних показників.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Оскільки пневматичні трубопровідні транспортери практично не використовуються у сапропеледобувані, то доводиться аналізувати подібні процеси.

Ступінь складності схематичного конструювання та обґрунтування параметрів машини і робочого органу залежить від очікуваної продуктивності, енергетичних витрат, властивостей матеріалу та призначення.

Оскільки дослідження має теоретичний характер то для обґрунтувань застосовуємо закони гідро та газо динаміки та руху двофазного середовища.

Для обґрунтування конструктивних параметрів використовували геометричні залежності з врахування властивостей сапропелю та двофазного середовища, а для оцінки роботоздатності машини і технологічних параметрів значення отриманих конструктивних параметрів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Всупереч аналогам ми пропонуємо вести розробку та переміщення сапропелів до берега пневматичною технологією. Щодо транспортування то пропонуємо використати трубопровідне, але з використання не нагнітальних насосів, а потоків стиснутого повітря. За рахунок такого технічного рішенні повітреструменевий робочий орган дозолить переміщувати поклади без додаткового впливу на зміну структури та властивості сапропелю, чим забезпечить вимоги до сапропелів для АПК. Дана машина та в процесі роботи не буде завдавати водному об'єкту та прибережній території шкоди, за рахунок переміщення в закритому просторі та розміщення покладів у геотубі. Тому ми запропонували схему такої машини, яку доцільно одночасно застосовувати з ерліфтними добувними засобами **(рис 1)**. Добувні і транспортуючі знаряддя розміщується на плавзасобі, є невеликих габаритів і можуть обслуговуватись одним оператором. В той час також можна змінювати довжину транспортувального трубопроводу в залежності від збільшення відстані добувного засобу від берега та способів переміщення забірного устаткування.

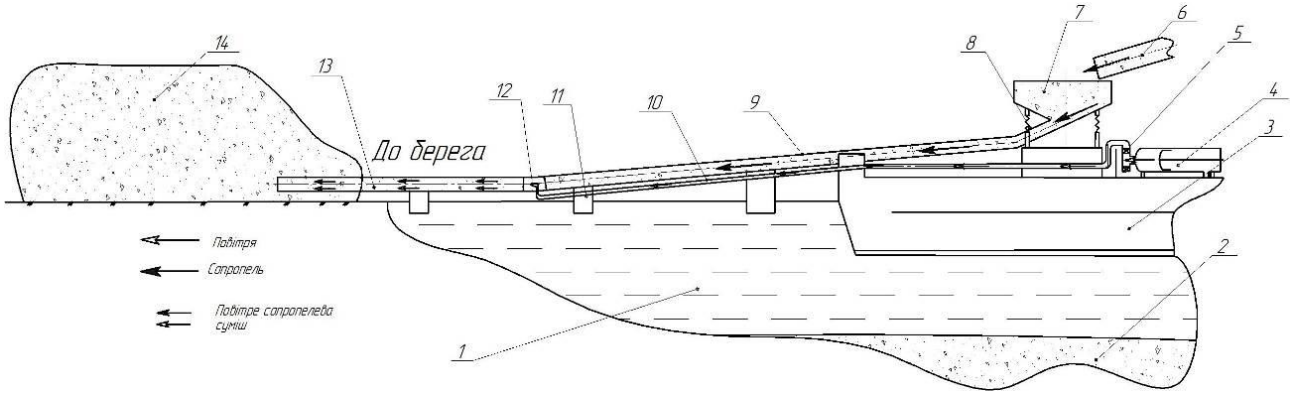


Рис. 1 – Схема функціональна засобу для транспортування сапропелю: 1 – водна поверхня, 2 – родовище, 3 – плавзасіб, 4 – компресор, 5 – золотник, 6 – добувний засіб, 7 – бункер, 8 – віброзбуджувач, 9 – похилий трубопровід, 10 – повітропровід, 11 – поплавковий пристрій, 12 – струменевий насос, 13 – горизонтальний трубопровід, 14 – геотуб

Щодо доставки сировини то пропонуємо застосовувати стандартизовані поплавкові трубопроводи, які виготовлені з полімерного матеріалу, пневматичний робочий орган, накопичувальний бункер та компресор. Робочий процес протікатиме за рахунок повітреструменевих потоків. Свіжодобутий сапропель потраплятиме у бункер з якого самостійно транспортуватиметься – по похилому трубопроводі до робочого органу. Також для пришвидшення самопливного переміщення буде застосовуватись віброзбуджувач. З конструктивної точки зору після закінчення похилого трубопроводу необхідно встановити робочий орган, що складається з раструбів і сопла. Це і буде струменевий насос, який пришвидшуватиме подальший рух покладів. Після потрапляння сапропелю в раструб з сопла буде виходити потік стиснутого повітря, який його забиратиме і штовхатиме далі. Таке двофазне середовище буде рухатись в закритому просторі (трубі), аж до виходу.

Тому можна вважати, що першим етапом потрапляння до робочого органу сапропелю буде самоплив та вібрація. В процесі роботи засобу з'явиться, ще одна складова, що виникне за рахунок розрідження покладів із зворотної сторони сопла, тому вони будуть пришвидшено підтягуватись.

Другий етап роботи і головний відбуватиметься за рахунок взаємодія повітря, де формуватиметься рухоме двокомпонентне середовище та дифузора і конфузора трубопроводу.

Розрахункова схема струменевого насосу із одиничним вихідним соплом для транспортування сапропелю зображена на (рис. 2).

Виконання потрібної корисної роботи з переміщення сапропелю запропонованим засобом відбуватиметься потом, що складається з двох компонентів, або ще як прийнято їх називати двох фаз.

Загальне відношення кількості переміщених покладів стиснутим повітрям та кількості повітря яке затратимо, і буде коефіцієнтом змішування *(Хомич 2014, Гідродинаміка)*:

$$\beta = \frac{L_2}{L_1} \tag{1}$$

де L_2 - кількість покладів сапропелю, що переміщаються;

L_1 - кількість затраченого повітря.

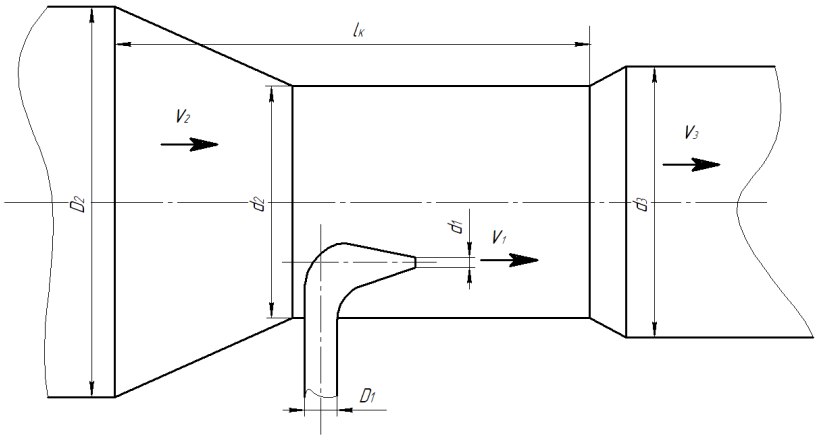


Рис. 2 – Схема струменевого насоса

Орієнтуючись на об'єм завантажувального бункера та годинну продуктивність добувного засобу за масою можна встановити годинну витрату повітря, яке задіяне для транспортування сапропелю:

$$L_1 = 3600 \frac{\mu d_1^{\,2} p_1}{\sqrt{10,288T}}, \text{ кг/год} \tag{2}$$

μ = 0,61…0,98 - коефіцієнт витрат (для сопла);

d_1 - діаметр сопла, м;

p_1 - тиск повітря перед виходом з сопла, кгс/см^2;

T - абсолютна температура повітря ^{0}К.

Звідси діаметр вихідного отвору сопла визначають із залежності:

$$d_1 = 0,0548\sqrt{G_1}, \text{ м} \tag{3}$$

G_2 – кількість переміщеного сапропелю кг/сек;

Тоді діаметр транспортуючої труби становитиме:

$$d_3 = \sqrt{\left(0,001d_1 + 0,004\right)^2 + 1,085\frac{G_2}{v_2}}, \text{ м} \tag{4}$$

v_2 - швидкість потоку сапропелю, що потрапляє в зону змішування м/с.

Довжина змішувальної камери робочого органу, що залежить від діаметрів та місця розміщення вихідного отвору сопла становитиме:

$$l_к = 8(d_2 - d_1), \text{ м} \tag{5}$$

d_2 - діаметр змішувача, м;

Швидкість двофазного потоку після змішування:

$$v_3 = 44\sqrt{\frac{\Delta p_2 + \Delta p_3}{(2-\eta)\left[1-n^2(2-\eta)\right]}}\text{, м/с} \quad (6)$$

Δp_2 - опір суміші у змішуваній частини насосу кгс/м^2 ;

Δp_3 - опір суміші у трубопроводі після виходу з насосу, кгс/м^2;

η - ККД насоса, залежить від найвигідніших відношень швидкості повітря та сапропелю;

n - відношення швидкості підсмоктування сапропелю до швидкості змішаного потоку $n = \frac{v_1}{v_2}$.

Швидкість повітря при виході із сопла:

$$v_1 = (1+\beta-n\beta)v_3 \quad (7)$$

Діаметр змішувальної камери:

$$d_2 = 1{,}13\sqrt{s_2} \quad (8)$$

s_2 - площа змішувальної камери насоса м^2.

Коефіцієнт корисної дії насоса розраховують з секундної кількості витраченого повітря і сапропелю та опорів зосереджених в розгалуженнях насосу:

$$\eta = \frac{L_2(\Delta p_2 + \Delta p_3)}{L_1 \cdot \Delta p_1} \quad (9)$$

Δp_1 - опір суміші перед змішувальною частиною насосу кгс/м^2.

Використовуючи наведені залежності можна розраховувати конструктивні параметри струменевого насоса для транспортування органічного сапропелю та технологічні параметри процесу, щоб забезпечити сільське господарство сировиною для добрив.

З огляду на проведені теоретичні дослідження засобу трубопровідного транспортування сапропелю лишається багато не вирішених питань. Питання стосуються, як конструктивних так і експериментальних досліджень. Тут ватро провести дослідження місця розташування повітряного сопла у насосі а також їх кількості в залежності від довжини трубопроводу.

З конструктивної точки зору, засіб трубопровідного транспортування може мати ряд переваг у порівнянні з аналогами це:

– транспортування можна вести при будь якій відстані до берега;
– відсутність потреби в осушуванні водойми або додатковому наповненні;
– автоматизація процесу;
– інтенсифікація процесу;
– висока надійність устаткування та простота конструкції;
– низька матеріаломісткість обладнання із можливістю використання композиційних матеріалів;
– малі енергетичні затрати для виконання процесу;
– висока продуктивність;
– прості процеси обслуговування;
– здатність отримувати якісну сировину згідно вимог;
– можливість використовувати альтернативний вид енергії.

ВИСНОВКИ

Аналіз та синтез машин, які використовуються для добування і транспортування сапропелів дозволив отримати конструкцію машини з пневматичним робочим органом, яка здатна при транспортуванні забезпечувати вимоги до сапропелів для АПК. На основі удосконалення технології запропоновані схеми машини та робочого органу, а також теоретично обґрунтовано конструктивно-технологічні параметри останнього.

Використання конструкції запропонованого робочого органу та пневматичного трубопровідного транспортера сапропелю, що забезпечує переміщення покладів від плавзасобу до місця складування, дасть можливість зменшити енергозатрати на доставку покладів в порівнянні з іншими представленими видами техніки способами доставки.

За представленою методикою розрахунку можна легко зробити підбір трубопроводів, у відповідності до очікуваної продуктивності.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто графічне проєктування кутових параметрів плоского дзеркального концентратора для підвищення ефективності використання сонячної енергії в геліосушарці. На основі законів геометричної оптики встановлено взаємозв'язок між положенням Сонця, орієнтацією дзеркальної поверхні та теплоприймальною поверхнею колектора.

Запропоновано конструктивну схему плоского дзеркального концентратора з розмірами дзеркального поля 2,0 × 1,30 м та площею відбивної поверхні близько 2,0 м². За інтенсивності сонячного випромінювання 800 Вт/м² теоретична потужність випромінювання, що надходить на дзеркальну поверхню, становить 1,6 кВт, а за коефіцієнта відбиття ρ = 0,85 потенційно може бути спрямовано до теплоприймальної системи близько 1,36 кВт. Це підтверджує можливість використання плоскої дзеркальної поверхні, як додаткового елемента концентрації сонячного випромінювання.

Встановлено, що основним геометричним принципом орієнтації дзеркала є рівність кутів падіння та відбиття. Для спрямування відбитого променя в задану точку теплоприймача нормаль до дзеркальної поверхні повинна розташовуватися по бісектрисі кута між напрямком падаючого сонячного променя та напрямком на приймальну поверхню. Це положення покладено в основу запропонованої графічної методики визначення кутів орієнтації дзеркальних елементів.

Графічний аналіз показав, що зміна висоти Сонця безпосередньо впливає на необхідний кут нахилу дзеркала. Для прийнятої розрахункової схеми при зміні висоти Сонця від 20 до 50° орієнтовний кут нахилу дзеркала змінюється від 65 до 125°. Отже, для забезпечення стабільного спрямування відбитого випромінювання на теплоприймальну поверхню необхідно передбачити можливість регулювання положення дзеркал або обмежити розрахунковий період їх ефективної роботи.

Визначення положення крайніх променів та координат «сонячного зайчика» дає можливість графічно оцінити ступінь перекриття теплоприймальної поверхні відбитим потоком. Запропонований підхід дозволяє визначати положення окремих дзеркальних елементів, контролювати траєкторії падаючих і відбитих променів та встановлювати геометричні параметри зони концентрації без застосування складних числових моделей.

Проведений аналіз підтверджує доцільність використання методів інженерної графіки для проєктування плоского дзеркального концентратора геліосушарки. Розроблена геометрична модель може бути використана, як основа для виконання робочих креслень, вибору конструктивних параметрів і розроблення механізму регулювання положення дзеркал. Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення кутових параметрів з урахуванням азимутального положення Сонця, географічного розташування установки, сезонних змін сонячної висоти, оптичних втрат та експериментального визначення теплового ефекту від застосування дзеркального концентратора.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Шевчук М.Й. (1996) Сапропелі України: Запаси, якість та перспективи використання / Sapropels of Ukraine: Reserves, quality and prospects for use / ААНУ, Інститут грунтознавства і агрохімії ім. О.Н. Соколовського. - Надстир'я, 1996. - 383 с.

Дем'янюк, О. С., Коніщук, В. В., Мусич, О. Г., Симочко, Л. Ю., & Мостов'як, І. І. (2022). Аналіз запасів сапропелю в Україні як альтернативної сировини органічних добрив (Analysis of sapropel reserves in Ukraine as an alternative raw material for organic fertilizers). Збалансоване природокористування, 2, 73-84. https://doi.org/10.33730/2310-4678.2.2022.261252

Кузнєцова, Т. О. (1992). Вдосконалення технології внесення сапропелю з метою підвищення родючості ґрунтів в умовах Західного Полісся України (Improvement of sapropel introduction technology in order to increase soil fertility in the conditions of the Western Polissia of Ukraine) [Дис. канд. техн. наук]. УПВГ, Рівне.

Хомич С.М. (2017) Технологічні основи пневматичного добування озерного сапропелю Technological basics of pneumatic extraction of lake sapropel / С.М. Хомич, І.Є. Цизь, В.А. Павлік // Сучасні технології в

машинобудуванні та транспорті: Накук. журнал. - Вип. 1.(8) – Луцьк. С. 144-149.

Булік, Ю. В. (2005). Обґрунтування процесу і параметрів механізму для добування сапропелю (Justification of the process and parameters of the mechanism for extracting sapropel) [Дис. канд. техн. наук]. Луцький державний технічний університет, Луцьк.

Гідробудівельник URL: https://gidrobud.kiev.ua/vydobutok-sapropelyu/

Хомич С.М. (2014) Обгрунтування параметрів забірного пристрою засобу для добування сапропелю (Justification of the parameters of the intake device for a sapropel extraction unit:) [Дис. канд. техн. наук: 05.05.11]. Тернопіль - 190 с.

Гідродинаміка газоріднних систем URL: https://studfile.net/preview/22083424/

Хлопецький Р.А. (2016) Удосконалення технології та засобу для добування озерних сапропелів з-під шару води (Improvement of the technology and equipment for extracting lake sapropel from beneath a water layer) [Дис. канд. техн. наук: 05.05.11]. Львів - 193 с.