

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ  
ІВАНА ПУЛЮЯ

**Хомич Сергій Миколайович**

УДК 631.3:621:695:553:973(043.3)

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАБІРНОГО ПРИСТРОЮ  
ЗАСОБУ ДЛЯ ДОБУВАННЯ САПРОПЕЛЮ**

Спеціальність 05.05.11 – Машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття  
наукового ступеня кандидата технічних наук

Тернопіль – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Луцькому національному технічному університеті  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент,

**Цизь Ігор Євгенович,**

Луцький національний технічний університет, завідувач  
кафедри «Інженерного та комп'ютерного забезпечення  
агропромислового комплексу».

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,

**Гевко Богдан Матвійович,**

Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя, завідувач кафедри «Технології  
машинобудування та автомобілів»;

кандидат технічних наук, доцент,

**Пришляк Віктор Миколайович,**

Вінницький національний аграрний університет,  
завідувач кафедри «Сільськогосподарських машин».

Захист відбудеться 28 січня 2015 року о 10 годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д58.052.02 у Тернопільському національному технічному університеті  
імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська 56, ауд. 79.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Тернопільського національного  
технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль,  
вул. Руська 56.

Автореферат розісланий 26 грудня 2014 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І.Б. Гевко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Серед відомих факторів, що сприяють формуванню високих врожаїв сільськогосподарських культур з якісними показниками, головна роль належить родючості ґрунтів, що є основою агропромислового комплексу. На Поліссі України, а саме у Волинській області, переважають дерново-підзолисті ґрунти, які характеризуються низькою природною родючістю, тому внесення добрив, особливо органічних, є визначальним фактором в отриманні високих врожаїв. В даному регіоні великим резервом підвищення родючості ґрунтів є використання у якості органічних добрив сапропелів.

Для розробки сапропелевих родовищ, з метою забезпечення сільського господарства альтернативними видами органічних добрив, можна використовувати засоби із забірними пристроями, які використовують енергію стисненого потоку повітря. Основною перевагою даних пристроїв є: зменшення витрати матеріалів на виготовлення та енерговитрат на роботу під час добування сапропелю, і, що найбільш важливо, – здатність добувати поклади природної вологості, оскільки це здешевить подальшу його переробку.

Вплив сапропелю на родючість ґрунту є багатограним та комплексним, але особливо яскравий ефект спостерігається на піщаних та супіщаних ґрунтах, оскільки їх ефективність там значно вища ніж на ґрунтах важкого механічного складу. Дія сапропелю і добрив на його основі не закінчується одним роком. Вони чинять позитивний вплив у багаторічній післядії елементів органо-мінерального складу на урожайність наступних культур із застосування науково-обґрунтованих сівозмін.

На основі вищесказаного слід відмітити, що сапропель являється екологічно чистою органо-мінеральною сировиною, яка забезпечує стійке зростання родючості ґрунту, вдосконалює і покращує його структуру, а також є якісним джерелом поповнення гумусу.

Існуючі пневматичні забірні пристрої призначені для роботи переважно з сипкими матеріалами, лише одиниці (ерліфтні) – з рідинами. Оскільки добування сапропелів має свої особливості, то ці установки мають ряд недоліків, в переважній більшості, це забивання піднімального трубопроводу та вихід повітря за межі корпусу (змішувача). Непристосованість конструкції даних забірних пристроїв для роботи з матеріалом підвищеної в'язкості викликає порушення технологічного процесу добування.

Тому розробка забірної пристрою, що входить в склад засобу для добування сапропелю з усуненням недоліків існуючих конструкцій є актуальною і своєчасною, що в комплексі дозволить зменшити енерговитрати на процес добування і наступне зневоднення сапропелю (сировини для органічних добрив), а внесення його у ґрунт сприятиме формуванню високих врожаїв сільськогосподарських культур.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана у Луцькому національному технічному університеті та входить до тематики наукових досліджень 2007-2008 рр. «Розробка технологій та засобів для функціонування замкнутої агроекологічної системи» (державний реєстраційний номер 0107U000231); 2013-2014 рр. «Розроблення технічних засобів для екологоощадних способів сівби та садіння сільськогосподарських культур» (державний реєстраційний номер 0113U000339).

**Мета роботи і задачі дослідження.** Мета дослідження – підвищення технологічної ефективності отримання сапропелевої сировини шляхом добування покладів природної вологості з використанням пневматичних засобів.

Для досягнення вказаної мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- провести аналіз відомих технологічних процесів добування сапропелів та на цій основі розробити теоретичні передумови проектування нових енергоощадних пневматичних пристроїв;
- обґрунтувати конструктивну схему та технологічний процес забірного пристрою засобу для добування сапропелю на основі ресурсозберігаючої пневматичної технології;
- розробити математичну модель руху повітряного потоку в середовищі сапропелю, як робочого органу, який розрихлює та піднімає сапропель з розробкою відповідного оснащення;
- встановити аналітичні залежності максимальної теоретичної продуктивності забірною пристрою від технологічних параметрів процесу добування та зміни об'ємного газовмісту за висотою змішувача (конічного корпусу);
- дослідити фізико-механічні властивості сапропелю родовища озера Зяцьке Волинської області у природному стані та встановити залежність зміни його коефіцієнта динамічної в'язкості від швидкості деформацій зсуву;
- дослідити траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості та вплив технологічних параметрів роботи забірною пристрою на продуктивність останнього і структуру потоку двохкомпонентного середовища повітря-сапропель у висхідній течії піднімального трубопроводу;
- провести лабораторно-виробничі випробування та техніко-економічну оцінку ефективності використання пневматичного забірною пристрою із обґрунтованими у результаті дослідження параметрами в складі засобу для добування сапропелю;
- розробити інженерну методику проектування технологічного оснащення.

**Об'єкт дослідження** – процес розрихлення і піднімання донних покладів органічного сапропелю пневматичним забірною пристроєм.

**Предмет дослідження** – встановлення взаємозв'язку між основними параметрами пневматичного забірною пристрою засобу для добування сапропелю та ефективністю його роботи і дослідження фізико-механічних властивостей органічного сапропелю.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження проведені із застосуванням положень механіко-математичного моделювання, гідроаеромеханіки, механіки двофазних середовищ, методів диференціального числення. Експериментальні дослідження проводились з використанням галузевих та розроблених методик на стандартному та виготовленому обладнанні і приладах, методик планування багатфакторного експерименту. Аналіз математичних моделей та обробка експериментальних даних здійснювалась за допомогою прикладних програм на ПК.

**Наукова новизна роботи** полягає в тому, що:

- набули подальшого розвитку дослідження низки фізико-механічних властивостей сапропелів органічного типу, які впливають на процес їх добування;
- вперше розроблена математична модель руху повітряного потоку у середовищі сапропелю з розробленням технологічного оснащення;
- виведено аналітичну залежність для розрахунку максимальної продуктивності пневматичного забірною пристрою на основі ресурсозберігаючих технологій;

- вперше отримано залежності для визначення розподілу об'ємного газовмісту за висотою змішувача пневматичного забірної пристрою;
- вперше досліджено закономірність зміни коефіцієнта динамічної в'язкості органічного сапропелю від зміни його вологості та швидкості деформації.

**Практичне значення одержаних результатів.** На базі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено і виготовлено експериментальний зразок засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм.

Розроблено методику і відповідне обладнання для визначення в'язкості сапропелів за змінного гідростатичного тиску, досліджено траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості. Дане обладнання використовується у навчальному процесі Луцького НТУ.

Наукова новизна запропонованих технічних рішень захищена трьома патентами України на корисні моделі № 39044, 51535, 72008.

Результати проведених досліджень забірної пристрою для добування сапропелю передані ПАТ «Ковельсільмаш», схвалені і можуть бути використані під час розробки та удосконалення обладнання для добування сапропелю.

**Особистий внесок здобувача.** Самостійно виконані основні теоретичні і експериментальні дослідження за темою дисертації. В наукових працях, опублікованих у співавторстві, автором безпосередньо проаналізовано існуючі засоби та технології для добування сапропелю [14, 15], запропоновано нову конструкцію забірної пристрою [11, 12], обґрунтовано його робочий процес [6, 16, 17] і економічну ефективність [19]. Проведено планування й реалізацію експериментальних досліджень забірної пристрою, здійснено обробку та аналіз результатів [1, 2, 3, 7, 18], розроблено конструкцію лабораторної установки за допомогою якої проведено дослідження в'язкості органічного сапропелю [4], визначено фізичні властивості даних відкладів [9]. Постановка задач, аналіз і трактування результатів виконано спільно з науковим керівником та, частково, із співавторами публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення наукових досліджень, що містяться в дисертації, доповідались й обговорювались на II, III, IV міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в АПК» (Луцьк, 2009р., 2011р., 2013р.); XVIII, XX міжнародній науково-практичній конференції «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві» (Глеваха, 2009р., 2012р.); VII, IX міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (Кіровоград, 2009р., 2013р.); міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми регіональних АПК» (Луцьк, 2011р.); XIII міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (Вінниця, 2012р.).

У повному обсязі робота доповідалась на науково-технічних семінарах Луцького національного технічного університету, Кіровоградського національного технічного університету і Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, де отримала позитивні відгуки.

**Публікації.** Основні дослідження дисертації опубліковано у 19 працях, з яких: статті у фахових наукових виданнях – 10 (1 – закордонна, 3 – одноосібних), патенти на корисну модель – 3 (1 – одноосібний), матеріали науково-технічних конференцій – 6.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 135 назв та 5 додатків. Основна

частина викладена на 161 сторінці, містить 79 рисунків і 11 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, встановлено об'єкт, предмет та завдання досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено інформацію про апробацію, структуру та обсяг роботи, сформовано основні положення дисертаційної роботи та найважливіші результати, які винесені на захист.

У першому розділі «Сучасний стан питання та задачі досліджень» проведено аналіз та узагальнення відомих наукових праць на основі яких досліджено механізм впливу сапропелів на родючість ґрунту. Сапропель вдосконалює і покращує структуру ґрунту, гранулометричний і хімічний склад, водно-повітряний і температурний режим, формує сприятливу будову профілю і щільність, а також є якісним, екологічно чистим, органо-мінеральним джерелом поповнення гумусу. Встановлено доцільність і особливості використання даних природних відкладів у складі органічних та органо-мінеральних добрив, сумішей, компостів.

На підставі проведеного огляду технологій добування сапропелів та конструкцій засобів і пристроїв, які в них використовуються, а також з врахуванням багатокритеріальної оцінки встановлено, що застосування існуючих конструкцій для добування сапропелів за гідравлічної і механічної технологій та їх поєднанні є малоефективним, оскільки вони мають низькі екологічні показники, енерго- та металоемкі, великогабаритні, складні, за конструкцією у більшості випадків під час добування спричиняють додаткове насичення сапропелів водою. З метою усунення даних недоліків і підвищення технологічної ефективності добутих відкладів запропоновано застосовувати пневматичну технологію добування сапропелів або поєднання її з механічною, на основі ресурсозберігаючих технологій.

Огляд відомих фізико-механічних властивостей сапропелю виявив, що значний вклад у дані дослідження здійснили такі вчені І.І. Ліштван, А.Я. Рубінштейн, М.З. Лопотко, Г.А. Євдокімова, Н.І. Браکش, Б.Я. Вімба, І.В. Косаревич, Г.П. Вірясов, В.Ф. Дідух, В.І. Бодак, Ю.В. Булік та інші.

Але при порівнянні наведених результатів виявили певні неточності, що вказує на необхідність проведення досліджень даних властивостей для кожного родовища окремо з метою отримання достовірних, адекватних результатів, які б застосовувалися при проектуванні добувних машин.

Оскільки використання забірних пристроїв пневматичної технології у засобах для добування сапропелю є новим напрямком у проектуванні таких машин і можливе лише у випадку досконалого аналізу відомих теоретичних закономірностей для обґрунтування їх параметрів, то аналіз теоретичних досліджень забірних пристроїв було проведено для суміжних галузей, де є відповідні напрацювання. Такими дослідженнями у плані теоретичного обґрунтування роботи забірних засобів, або елементів що входять до їх складу, займалися: Г.Ф. Козоріз, В.І. Плавінський, Р.Л. Зенков, А.А. Вайсон, А.І. Матвеев, Г.С. Носко, М.М. Шапунов, А.І. Харін, А.О. Співаковський, В.К. Дьячков, А.Г. Фролов, В.П. Пишкін, Н.В. Кіслов, В.И. Бакшанський і інші.

У результаті проведення аналізу літературних джерел та патентної інформації встановлено низку питань, які потребують вивчення. Наведені аргументи зумовили вибір теми дисертації, визначили її мету і задачі.

У другому розділі «Теоретичні передумови обґрунтування параметрів забірної пристрою засобу для добування сапропелю» обґрунтовано схему технологічного процесу забірної пристрою засобу для добування сапропелю (рис. 1), а також запропоновано теоретичні передумови обґрунтування його параметрів.

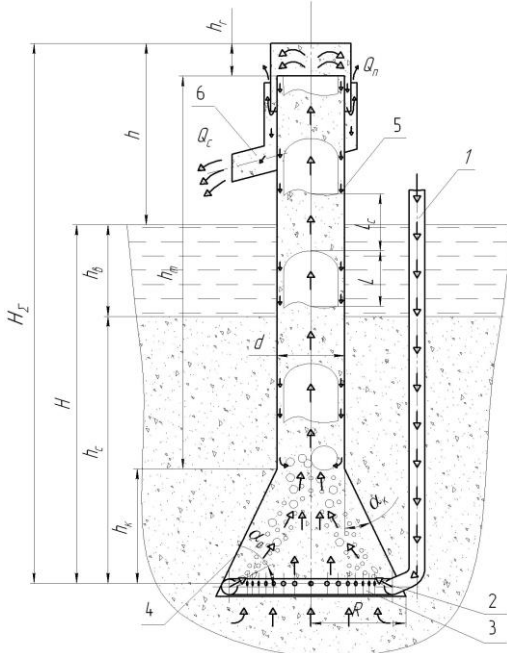


Рис. 1. Розрахункова схема забірної пристрою

Принцип роботи запропонованого пристрою базується на використанні енергії повітряного потоку за рахунок якого формується висхідний потік двокомпонентного середовища «повітря-сапропель». Розрихлення та забір підводних покладів відбувається у корпусі 4 (змішувачі), потоком стиснутого повітря (бульбашками), що надходить від компресора магістраллю подачі повітря 1, і виходить з сопел 2 кільцевого напірного повітропроводу 3. Піднімання покладів (пробок сапропелю) відбувається снарядами повітря, які формуються в зоні переходу корпусу, у піднімальний трубопровід 5 за рахунок поступового об'єднання бульбашок, і прямують до вивідного рукава 6. Описаний режим має назву снарядний і згідно досліджень А.П. Кононенка є найменш енергозатратним. Снаряди повітря та пробки сапропелю рухаються по чергові.

Співвідношення у суміші між повітрям та сапропелем прийнято оцінювати об'ємним газовмістом  $\varphi_n$ , це відношення об'єму повітря  $V_n$  у суміші до об'єму  $V$ . Снарядна структура повітря-сапропелевої суміші може існувати коли об'ємний газовміст знаходиться в межах  $0,2 \dots 0,3 < \varphi_n < 0,6 \dots 0,8$ .

Залежність, яка пов'язує сумарну геометричну довжину забірної пристрою (рис. 1.) із характеристиками родовища сапропелю, має вигляд:

$$h + H = h_k + h_m + h_r = h_g + h_c + h = H_\Sigma, \quad (1)$$

де  $h$  – висота розташування пристрою над поверхнею води, м;  $H$  – глибина добування, м;  $h_k$  – висота корпусу, м;  $h_m$  – довжина піднімального трубопроводу, м;  $h_g$  – товщина шару води в озері, м;  $h_c$  – товщина шару сапропелю з під якого ведеться добування, м;  $h_r$  – висота розташування вивідного рукава над піднімальним трубопроводом, м;  $H_\Sigma$  – габаритний розмір забірної пристрою, м.

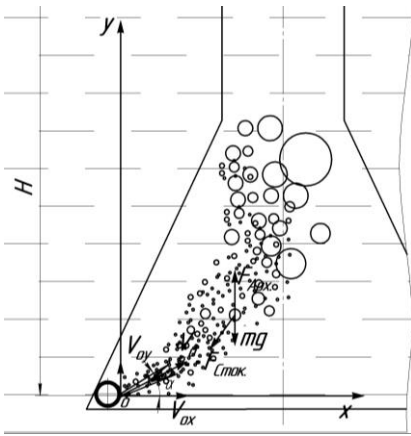


Рис. 2. Розрахункова схема динаміки процесу у змішувачі пристрою

При дослідженні динамічних процесів, що відбуваються в змішувачі забірному пристрою, розглядали рух довільної бульбашки повітря масою  $m$ , яка рухається у середовищі сапропелю з глибини  $H$  та виконує механічну роботу. Початкова швидкість бульбашки задана її проекціями  $v_{ox}$  та  $v_{oy}$  на осі  $OX$  і  $OY$  двовірної декартової системи координат  $XOY$  (рис. 2).

З врахуванням вище наведеного на бульбашку діють наступні сили: сила ваги  $mg$ , виштовхувальна сила  $F_{Арх}$ , сила опору  $F_{Сток}$ .

На основі формули Бернуллі та рівняння Менделєєва-Клапейрона об'єм бульбашки становить:

$$V = \frac{2 \cdot m \cdot R \cdot T}{\mu \cdot (2 \cdot P + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2))}, \quad (2)$$

де  $m$  – вага повітря у бульбашці, кг;  $\mu$  – молярна маса повітря,  $\mu=0,029$  кг/моль;  $R$  – універсальна газова стала,  $R=8,31$  Дж/моль·К;  $T$  – абсолютна температура бульбашки, К;  $P_{атм}$  – атмосферний тиск, Па;  $\rho$  – густина сапропелю, кг/м<sup>3</sup>;  $y$  – біжуче значення координати центра мас бульбашки вздовж осі  $OY$ , м;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>,  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  – швидкості руху центра мас бульбашки у проекції на осі координат, м/с;  $H$  – глибина початку руху бульбашки, м.

З урахуванням (2) виштовхувальна сила Архімеда набуде вигляду:

$$F_{Арх} = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \rho \cdot R \cdot T}{\mu \cdot (2 \cdot P_{атм} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2))}. \quad (3)$$

Сила лобового опору Стокса, що діє на бульбашку радіусом  $r_0 = \sqrt[3]{3V/4\pi}$ , дорівнює:

$$F_{Сток} = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot q \cdot v^{1-b} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m \cdot R \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot (2 \cdot P_{атм} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2))}}, \quad (4)$$

де  $\eta$  – динамічний коефіцієнт в'язкості сапропелю, Па·с;  $v$  – швидкості руху бульбашки, м/с;  $q$  та  $b$  – емпіричні коефіцієнти, значення яких залежить від вологості сапропелю.

Відповідно до II закону Ньютона запишемо:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_{Арх} + \vec{F}_{Сток}. \quad (5)$$

З урахуванням (3) та (4) формула (5) у проекціях на осі координат після перетворень набуде вигляду:



$$\begin{cases} \ddot{x} = -6 \cdot \pi \cdot \frac{R \cdot T}{\mu} \cdot q \cdot \dot{x}^{1-b} \cdot \sqrt[3]{2 \cdot \pi \cdot P_{атм} \cdot V_0 (2 \cdot P_{атм} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2))}; \\ \ddot{y} = -g + \frac{2 \cdot g \cdot \rho \cdot R \cdot T}{\mu \cdot (2 \cdot P_{атм} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2))} - 6 \cdot \pi \cdot \frac{R \cdot T}{\mu} \cdot q \cdot \dot{y}^{1-b} \times \\ \times \sqrt[3]{2 \cdot \pi \cdot P_{атм} \cdot V_0 (2 \cdot P_{атм} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2))}. \end{cases} \quad (6)$$

За початкову швидкість повітряної бульбашки  $v_0$  приймаємо швидкість у найменшому перерізі потоку повітря під час його виходу крізь сопло напірного повітропроводу. Дану швидкість для адиабатного процесу з врахуванням глибини  $H$  розраховали за формулою:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_n}{(k-1) \cdot \rho_{нов}} \left[ 1 - \left( \frac{P_{атм} + \rho \cdot g \cdot H}{P_n} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (7)$$

де  $k$  – показник адиабати,  $k=1,4$ ;  $\rho_{нов}$  – густина повітря,  $\text{кг/м}^3$ ;  $P_n$  – тиск повітря у кільцевому напірному повітропроводі, Па.

Розв'язок системи диференціальних рівнянь здійснювали числовим методом Розенброка у середовищі Maple за якими побудовано графічні залежності траєкторії руху бульбашки повітря в сапропелі (рис. 3).

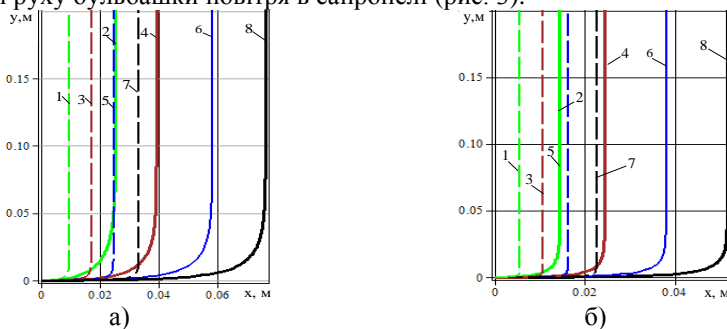


Рис. 3. Форми меж руху повітряного потоку у сапропелі вологістю:

а)  $W=95\pm 1\%$ , б)  $W=90\pm 1\%$  після виходу із горизонтального сопла діаметром 1,0мм з глибини  $H=4\text{м}$  за тиску подачі повітря  $P_n$ : 1-2 – 200кПа; 3-4 – 300кПа; 5-6 – 400кПа; 7-8 – 500кПа

Аналіз отриманих граничних залежностей вказує на те, що проникання горизонтального повітряного потоку у шари (відклади) сапропелів вологістю  $W=95\pm 1\%$ , при тиску подачі  $P_n=300\text{кПа}$  становить 0,04м, а для  $P_n=500\text{кПа}$  – 0,08м. Для сапропелю із  $W=90\pm 1\%$  за тих же тисків даний параметр не перевищує 0,055м. Також встановлено, що охоплення повітряного потоку кінчним корпусом забірної пристрою буде забезпечено конусом із кутом нахилу твірних  $\alpha_k=20\dots 30^\circ$ .

З метою визначення максимальної теоретично можливої продуктивності забірної пристрою засобу для добування сапропелю встановлено максимальну роботу, яку виконує сила Архімеда при підйомі бульбашки повітря об'ємом  $V_0$ . Дана сила відповідно до (3) становитиме:

$$F_{Apx} = P_{амм} \cdot \overline{\rho}_c \cdot g \cdot V_0 / (P_{амм} + \overline{\rho}_c \cdot g \cdot (H - y)). \quad (8)$$

Оскільки бульбашка підіймається з глибини  $H$ , то тиск газу на відстані  $y$  від вхідного отвору змішувача (конічного корпусу) становитиме:

$$P = P_{амм} + \overline{\rho}_c \cdot g \cdot (H - y), \quad (9)$$

де  $\overline{\rho}_c$  – усереднена за глибиною  $H$  густина сапропелю,  $\text{кг/м}^3$ .

Тоді робота сили Архімеда під час підйому бульбашки з глибини  $H$  на поверхню дорівнює:

$$A_{Apx} = \int_0^H F_{Apx} dy = P_{амм} \cdot V_0 \cdot \ln \left( 1 + \frac{\overline{\rho}_c \cdot g \cdot H}{P_{амм}} \right). \quad (10)$$

Оскільки вантажем є сапропель, густина (об'ємна маса) якого змінюється із глибиною добування, то  $\rho_c$  є функцією від  $H$ , яка для досліджуваних покладів має вид формули  $\gamma = 30,449H + 985,37$ . Мінімальна робота, яку потрібно виконати для підйому з глибини  $H$  даного вантажу об'ємом  $V_c$  і густиною  $\overline{\rho}_c$ , становить:

$$A = (30,449 \cdot H + 985,37 - \overline{\rho}_c) \cdot V_c \cdot g \cdot H. \quad (11)$$

Прирівнюючи (9) та (10), отримаємо:

$$V_c = \frac{P_{амм} \cdot V_0}{(30,449 \cdot H + 985,37 - \overline{\rho}_c) \cdot g \cdot H} \ln \left( 1 + \frac{\overline{\rho}_c \cdot g \cdot H}{P_{амм}} \right). \quad (12)$$

Залежність (12) виражає максимально можливий об'єм сапропелю  $V_c$ , який може підняти з глибини  $H$  бульбашка повітря, об'єм якої за атмосферного тиску  $P_{амм}$  дорівнює  $V_0$ . Але оскільки у змішувач подається не одна бульбашка, а повітряний потік, який за прийнятих допущень складається із окремих бульбашок, то сумарний об'єм бульбашок, за умови, (що швидкість повітря є однаковою за перерізом вихідного круглого сопла та добування відбувається за перепаду тисків, який є меншим-рівним від критичного значення), визначатиметься сумарною об'ємною подачею повітря  $Q_{nV}$  у пристрій:

$$Q_{nV} = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \mu \cdot P_{амм}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T \cdot P_n^2}, \quad (13)$$

де  $n$  та  $d$  – відповідно, кількість та діаметр вихідних сопел кільцевого напірного повітропроводу, м.

Тоді сумарна продуктивність пристрою для добування сапропелю становить:

$$V_{\Sigma c} = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{(30,449 \cdot H + 985,37 - \overline{\rho}_c) \cdot 4 \cdot \mu \cdot g \cdot H} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T \cdot P_n^2} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\overline{\rho}_c \cdot g \cdot H}{P_{амм}} \right). \quad (14)$$

За допомогою отриманої залежності можна відслідкувати вплив на продуктивність тиску подачі повітря та глибини добування. З цією метою за формулою

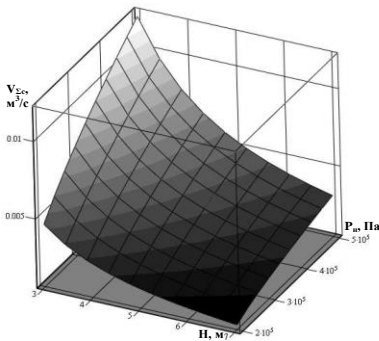


Рис. 4. Залежність максимальної теоретичної продуктивності  $V_{\Sigma c}$  забірною пристрою від глибини добування  $H$  та тиску подачі повітря  $P_n$

закономірності зміни об'ємного газомісту за висотою корпусу, розглянули деяке довільне січення повітряно-сапропелевого потоку висотою  $\Delta h \rightarrow 0$  розташоване на віддалі  $y$  від осей вихідних сопел кільцевого напірного повітропроводу (рис. 5).

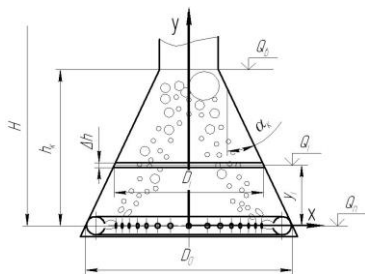


Рис. 5. Розрахункова схема до визначення закономірності розподілу об'ємного газомісту за висотою корпусу

(14) побудована графічна залежність (рис. 4), яка вказує на те, що для досягнення максимальної продуктивності забірною пристрою слід вести добування із глибин у межах  $H=3\dots 5$ м. Оскільки за більших глибин відбувається різке зниження продуктивності пристрою, а за менших – будуть добуватись поклади із низьким вмістом органічної речовини. Добування доцільно вести за тиску подачі повітря  $P_n=400\dots 500$ кПа.

Як зазначалось вище, критерієм існування снарядної структури руху є об'ємний газоміст. Також відомо, що за постійної подачі повітря у конічний корпус (змішувач), об'ємний газоміст за висотою буде змінюватись. Тому, з метою встановлення

закономірності зміни об'ємного газомісту за висотою корпусу, розглянули деяке довільне січення повітряно-сапропелевого потоку висотою  $\Delta h \rightarrow 0$  розташоване на віддалі  $y$  від осей вихідних сопел кільцевого напірного повітропроводу (рис. 5).

Об'ємний газоміст для даної координати

$y_i$  буде рівний:

$$\varphi_n(y_i) = S_{нов.}(y_i) / S_{\Sigma}(y_i), \quad (15)$$

де  $S_{нов.}(y_i)$  – площа, яку у розглядуваному перерізі займає повітря,  $m^2$ ;  $S_{\Sigma}(y_i)$  – сумарна площа даного перерізу,  $m^2$ , що становить:

$$S_{\Sigma}(y_i) = \pi \cdot f^2(y_i) = \pi \cdot (D_0/2 - y_i \cdot tg \alpha_k)^2, \quad (16)$$

де  $f(y_i)$  – функція якою задається рівняння твірної бічної поверхні корпусу;  $D_0$  – діаметр корпусу на рівні осей вихідних сопел напірного повітропроводу, м;  $\alpha_k$  – кут відхилення від вертикалі твірної конічного корпусу, град.

Із умови нерозривності повітряного потоку у конічному корпусі справедливою є рівність  $Q_n = Q_e = Q_i$ , де  $Q_n$  – масова подача повітря у конічний корпус,  $kg/m^3$ ;  $Q_e$  – масова витрата повітря через вихідний отвір корпусу,  $kg/m^3$ ;  $Q_i$  – масова витрата повітря виділеного перерізу,  $kg/m^3$ . Об'ємна витрата повітря виділеного перерізу становитиме:

$$Q_{v.}(y_i) = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T \cdot P_n}}{4 \cdot \mu \cdot (P_{амм} + \rho_c \cdot g \cdot (H - y_i))}. \quad (17)$$

З іншої сторони об'ємна витрата повітря через виділений переріз становить:

$$Q_{v.}(y_i) = S_{нов.}(y_i) \cdot v_y(y_i), \quad (18)$$

де  $v_y(y_i)$  – вертикальна складова швидкості повітряного потоку у перерізі, м/с.

Прирівнявши праві частини виразів (17) та (18), отримаємо:

$$S_{нов.}(y_i) = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T \cdot P_n^2}}{4 \cdot \mu \cdot (P_{атм} + \bar{\rho}_c \cdot g \cdot (H - y_i)) \cdot v_y(y_i)}. \quad (19)$$

Врахувуючи, що формула (15) для визначення об'ємного газомісту записана для довільного перерізу, а також вирази (16) та (19), отримуємо:

$$\varphi_n(y) = \frac{n \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T \cdot P_n^2}}{4 \cdot \mu \cdot (P_{атм} + \bar{\rho}_c \cdot g \cdot (H - y)) \cdot v_y(y) \cdot \left(\frac{D_0}{2} - y \cdot \operatorname{tg} \alpha_\kappa\right)^2}. \quad (20)$$

Отримана залежність разом із розрахованою за моделлю (6) вертикальною складовою швидкості повітряного потоку  $v_y(y_i)$  дозволяє отримати шукану закономірність зміни об'ємного газомісту за висотою конічного корпусу.

Для дослідження впливу конструктивних параметрів конічного корпусу на зміну об'ємного газомісту у середовищі Марле були побудовані графічні залежності (рис. 6), з яких можна встановити, що необхідне значення газомісту  $\varphi_n > 0,2 \dots 0,3$  досягається при висоті корпусу  $h_\kappa = 0,18 \dots 0,32$  м.

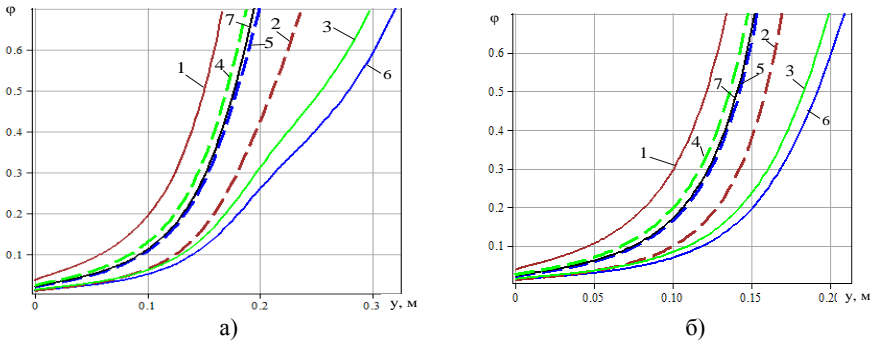


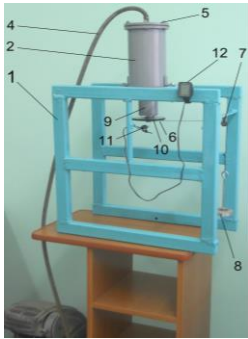
Рис. 6. Залежність зміни об'ємного газомісту  $\varphi$  з висотою конічного корпусу за а)  $\alpha_\kappa = 20^\circ$ ; б)  $\alpha_\kappa = 30^\circ$ : 1. –  $D_0 = 0,3$  м,  $H = 4$  м,  $n = 60$ ,  $P_n = 500$  кПа; 2. –  $D_0 = 0,3$  м,  $H = 4$  м,  $n = 20$ ,  $P_n = 500$  кПа; 3. –  $D_0 = 0,4$  м,  $H = 4$  м,  $n = 40$ ,  $P_n = 500$  кПа; 4. –  $D_0 = 0,3$  м,  $H = 4$  м,  $n = 40$ ,  $P_n = 500$  кПа; 5. –  $D_0 = 0,3$  м,  $H = 4$  м,  $n = 40$ ,  $P_n = 400$  кПа; 6. –  $D_0 = 0,4$  м,  $H = 4$  м,  $n = 40$ ,  $P_n = 400$  кПа; 7. –  $D_0 = 0,3$  м,  $H = 6$  м,  $n = 40$ ,  $P_n = 500$  кПа.

У третьому розділі «Програма і методика проведення експериментальних досліджень» представлені методики, прилади та обладнання для визначення фізико-механічних властивостей сапропелю. Запропоновані лабораторні установки для визначення в'язкості сапропелю та моделювання фізичних процесів, що відбуваються у забірному пристрої під час підводної розробки покладів.

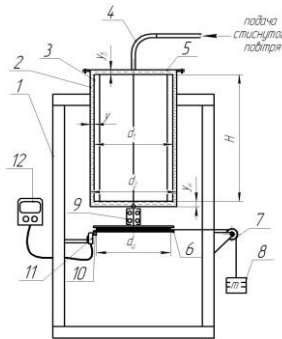
Згідно галузевих методик з використанням стандартних приладів і обладнання досліджували природну вологість, зольність та об'ємну масу сапропелів. Вказані властивості впливають на процес добування і є специфічними для різних озерних родовищ та змінюються з глибиною залягання сапропелевих покладів.

З метою практичного використання математичних моделей, отриманих у другому розділі, проводили дослідження динамічної в'язкості сапропелю, а також

встановили закономірності впливу на даний показник гідростатичного тиску (тиск поверхневого шару сапропелю, пелогену, води) та швидкості деформації зсуву.



а)



б)

Рис. 7. Установка для дослідження в'язкості сапропелю: а) – загальний вигляд; б) – принципова схема

та блок 7 вантажами 8. Швидкість обертання внутрішнього циліндра регулюється масою вантажів, що вкладаються. Вал внутрішнього циліндра обертається у підшипниковій опорі 9. Для реєстрації частоти обертання внутрішнього циліндра на шківі закріплений постійний магніт 10, а на рамі 1 – давач 11, останній у свою чергу з'єднаний провідником із вимірювальним приладом 12, який фіксує числове значення максимальної частоти обертання внутрішнього циліндра за допомогою якого визначають швидкість зсуву шарів сапропелю в установці.

Використовуючи отримані у результаті досліджень значення частоти обертання  $n$  валу циліндра та сумарної маси вантажів, що їй відповідають, розраховували коефіцієнт динамічної в'язкості сапропелю за залежністю:

$$\eta = m_e \cdot g \cdot d_{in} / \left( 2 \cdot \pi^2 \cdot n \cdot d_1^3 \cdot H \cdot \left( 1 + \frac{d_1}{3 \cdot H} \right) \left( \frac{1}{d_2 - d_1} + \frac{1}{3 \cdot y_v} + \frac{1}{3 \cdot y_n} \right) \right), \quad (21)$$

де  $m_e$  – сумарна маса вантажів під дією яких обертається внутрішній циліндр, кг;  $d_{in}$  – діаметр шківця приводу внутрішнього циліндра, м;  $n$  – частота обертання валу внутрішнього циліндра, об/с;  $d_1, H$  – зовнішній діаметр та висота внутрішнього циліндра, м;  $d_2$  – внутрішній діаметр зовнішнього циліндра, м;  $y_v, y_n$  – відстань між верхньою і нижньою основами внутрішнього циліндра та зовнішнім циліндром, м.

Для перевірки адекватності математичної моделі руху повітряних бульбашок, як елементу повітряного потоку, та обґрунтування параметрів системи подачі повітря у пристрій, а також візуалізації процесу було проведено експериментальні дослідження форм повітряного потоку у прозорих рідинах різної в'язкості. Під час експерименту у якості досліджуваних рідин використовувались вода, індустриальне масло SAE40 та концентрований миючий засіб (ТУУ 24.5 23731918 - 010 - 2003). Дослідження проводились на лабораторній установці фото якої наведено на рис. 8.

Для цього була розроблена та виготовлена лабораторна установка (рис. 7), принцип роботи якої базується на ротаційному методі. Основою даної установки є зовнішній 2 та внутрішній 3 циліндри. У кільцевому проміжку між ними розташовується дослідний матеріал, а герметизація зовнішнього циліндра забезпечується кришкою 5. Гідростатичний тиск створюється стиснутим повітрям, що нагнітають від компресора магістраллю 4. Обертовий рух внутрішньому циліндру надається через шків 6

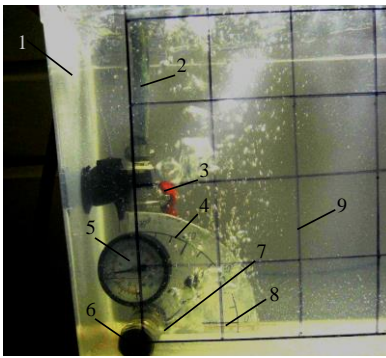
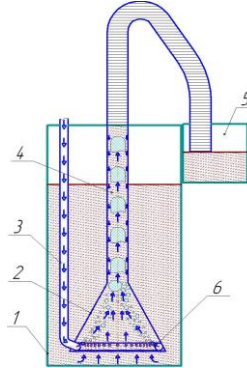


Рис. 8. Установки для дослідження руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості

корпусі вентиля – шкала проградуєвана у градусах 4. Зміна кута нахилу осі сопла до горизонту здійснювалась завдяки послабленню з'єднувальної ковзної муфти із наступним її затягуванням. Під час досліджень використовувались відрізки повітропроводу із циліндричним соплом діаметрами 0,5; 1,0; 1,5мм. Фіксація траєкторії руху бульбашок повітряного потоку у середовищі рідин здійснювалась за допомогою цифрової фотокамери NIKON COOLPIX L22.



а)



б)

Рис.9. Експериментальна установка: а) – загальний вигляд; б) – принципова схема

прозорого пластику, і призначена для візуального спостереження за процесами, що відбуваються в середовищі сапропелю. Також до передньої прозорої стінки ємкості герметично кріпиться поздовжній розріз забірної пристрою (згідно рис. 2), який у свою чергу складається із корпусу 2, напірного повітропроводу із соплами 6 та піднімального трубопроводу 4. Подача стиснутого повітря від компресора до сопел здійснюється через магістраль 3. Надходження сапропелю із піднімального трубопроводу до мірної посудини 5 забезпечується вивідним рукавом.

У четвертому розділі «Результати експериментальних досліджень» викладено результати досліджень природної вологості, зольності та об'ємної маси

Дана установка складається із пластикової ємкості 1, на передній стінці якої нанесено координатну сітку 9. У внутрішній частині ємкості кріпиться відрізок повітропроводу 6 із циліндричним соплом 7 певного діаметру. Для подачі повітря від компресора у повітропровід використовується гнучкий армований шланг 2. Попереднє регулювання тиску подачі повітря здійснювалось вентилем установки 3, а точне – золотниковим механізмом компресора. Поточне значення тиску виходу повітря із сопла реєстрували манометром 5. Для визначення кута нахилу осі сопла до горизонту на повітропроводі співвісно із ним кріпилась стрілка 8, а на

Оскільки добування сапропелю відбувається з підводних родовищ, а сам робочий процес проходить в середовищі покладів, то візуально спостерігати за явищами, які відбуваються у змішувачі та підйомному трубопроводі неможливо, тому для більш чіткого уявлення про режим роботи та структуру потоку в лабораторних умовах була сконструйована стаціонарна експериментальна установка (рис. 9). Також за допомогою цієї установки досліджувалась продуктивність.

Дана установка містить ємкість 1, передня стінка якої виготовлена з

сапропелів озера Зяцьке. За рахунок отриманих даних встановлені залежності, за допомогою яких можна оцінювати їх значення із зміною глибини залягання:

$$\text{- природна вологість} \quad W = 0,1280 \cdot h^2 - 2,7211 \cdot h + 99,8970, \quad (22)$$

$$\text{- зольність} \quad A^c = 1,4046 \cdot h + 19,9910, \quad (23)$$

$$\text{- об'ємна маса} \quad \gamma = 30,449 \cdot h + 985,370. \quad (24)$$

Оскільки особливу цінність для підвищення родючості ґрунту складає органічна речовина сапропелю, то встановлена залежність зміни вмісту у покладах абсолютно сухої органічної речовини з глибиною їх залягання:

$$k(h) = \gamma(h) \cdot (1 - W(h)/100) \cdot (1 - A^c(h)/100). \quad (25)$$

Для аналізу отриманої залежності побудований графік (рис.10).

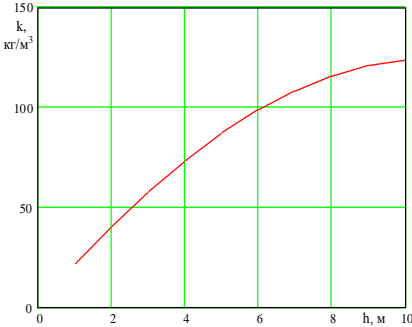


Рис. 10. Залежність вмісту абсолютно сухої органічної речовини  $k$  із глибиною залягання покладів  $h$

в'язкості сапропелю зниження його вологості, особливо, це проявляється за швидкостей відносного руху шарів  $u < 0,2$  м/с (рис.11).

Із отриманих результатів та побудованих графічних залежностей видно, що динамічна в'язкість сапропелю зменшується із зростанням швидкості деформацій зсувом між шарами. Особливо значим цей вплив є за зміни швидкостей у діапазоні  $u = 0,005 \dots 0,2$  м/с. Також у даному діапазоні швидкостей виявляється і вплив гідростатичного тиску на зростання динамічної в'язкості сапропелю. Очевидно, що таке явище спричинене неомогенною структурою покладів та наявністю волокнистих включень, а отже і наявністю сил зчеплення між ними. Проведена апроксимація експериментальних значень коефіцієнта динамічної в'язкості у діапазоні швидкості  $u > 0,05$  м/с без урахування впливу гідростатичного тиску степеневую функцією дозволила отримати наступні залежності:

$$\text{- для сапропелю } W=95 \pm 1\%, \quad \eta = 0,352u^{-0,8156}, \quad (26)$$

$$\text{- для сапропелю } W=90 \pm 1\%, \quad \eta = 0,9083u^{-0,9725}, \quad (27)$$

$$\text{- для сапропелю } W=85 \pm 1\%, \quad \eta = 2,5144u^{-1,0273}. \quad (28)$$

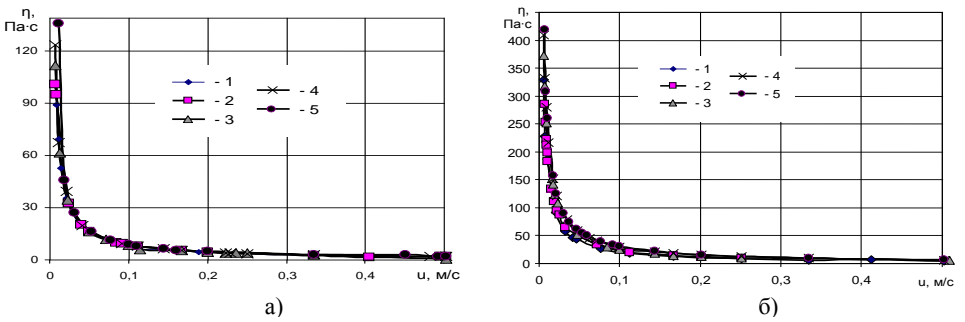


Рис. 11. Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  сапропелю вологості: а)  $W=90\pm 1\%$ ; б)  $W=85\pm 1\%$ , від швидкості зсуву шарів  $u$  за гідростатичного тиску  $P_n$ : 1 – 0кПа; 2 – 50кПа; 3 – 100кПа; 4 – 150кПа; 5 – 200кПа

Також визначено коефіцієнт динамічної в'язкості концентрованого миючого засобу (ТУ У 24.5 23731918-010-2003). У результаті апроксимації експериментальних значень в'язкості  $\eta$  степеневою функцією було отримано наступну залежність:

$$\eta = 0,327u^{-0,7714}. \quad (29)$$

Отримані значення коефіцієнта динамічної в'язкості (29) вказують на те, що за величиною досліджуваної характеристики даний миючий засіб близький до досліджуваного сапропелю вологістю  $W=95\pm 1\%$ . Тому його можна використовувати в якості прозорого моделюючого середовища.

Обробку експериментальних даних для дослідження форм повітряного потоку проводили у наступній послідовності. На отримані у результаті досліджень фотографічні зображення в середовищі Microsoft Office Excel наносили обмежуючі лінії, що описували форми повітряного потоку. За отриманими таким чином координатами кривих, в подальшому будували точкові графіки. На рис. 12 наведені результати дослідження даного явища у концентрованому миючому засобі.

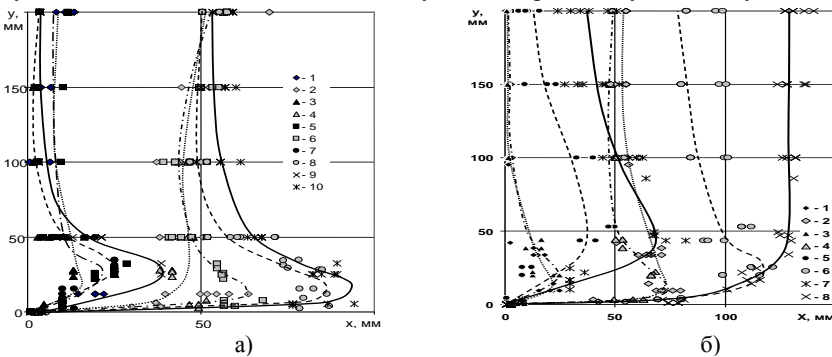


Рис. 12. Форми меж руху повітряного потоку у миючому засобі після виходу із горизонтального отвору діаметром: а) 1,0мм; б) 1,5мм за тиску подачі повітря  $P_n$ : 1-2 – 100кПа; 3-4 – 200кПа; 5-6 – 300кПа; 7-8 – 400кПа; 9-10 – 500кПа

Порівняння експериментальних форм кривих із графічними залежностями побудованими за математичною моделлю (6) (рис. 3) вказують на її адекватність. Також дані досліджень вказують на те, що з метою кращого розрихлення покладів пониженої вологості можна використовувати завихрений повітряний потік.



Завихрення досягається завдяки горизонтальному розташуванню осей вихідних сопел із діаметром у діапазоні 1,0-1,5мм та тиску подачі повітря  $P_n=300-400$ кПа.

Для встановлення залежності впливу на продуктивність пристрою досліджуваних факторів (тиску подачі повітря  $P_n$ , довжини піднімального трубопроводу  $h_m$  та глибини залягання сапропелю  $l$ ), у вигляді рівняння регресії було проведено трифакторний експеримент із використанням зразків сапропелю добутих із озера Зацьке вологістю  $W=90...85\pm 1\%$ . Метою експерименту було визначення маси сапропелю, що подається пристроєм за одиницю часу.

Обробка даних трифакторного експерименту, проведеного за симетричним некомпозиційним планом Бокса-Бенкіна другого порядку, здійснювалась на ПК за розробленою програмою у середовищі Mathcad. Остаточне рівняння регресії із натуральними значеннями факторів набуло вигляду:

$$Q=3,545+0,0141\cdot P_n-10,73\cdot l+0,472\cdot h_m-0,00005\cdot P_n^2+11,033\cdot l^2-1,56\cdot h_m^2+0,033\cdot P_n\cdot l, \quad (30)$$

де  $P_n$  – робочий тиск подачі повітря, кПа;  $l$  – товщина шару сапропелю з під якого ведеться добування, м;  $h_m$  – довжина піднімального трубопроводу, м.

Для відслідкування динаміки зміни продуктивності забірною пристрою за отриманим рівнянням регресії були побудовані поверхні відгуку (рис. 13).

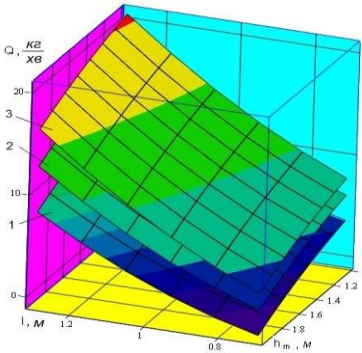


Рис. 13. Залежність продуктивності  $Q$  від глибини залягання сапропелю  $l$  та довжини трубопроводу  $h_m$  при тиску нагнітання повітря  $P_n$ : 1 – 100кПа; 2 – 200кПа; 3 – 300кПа

На основі візуального спостереження за рухом повітряно-сапропелевого потоку встановлено, що структура даного потоку не є гомогенною. У змішувачі пристрою вона складається з дрібних самостійних бульбашок, які при висхідному русі поступово об'єднуються і формують бульбашкову структури руху середовища. У піднімальному трубопроводі потік складається із великих бульбашок (снарядів) і сапропелевих пробок, які у свою чергу містять газову фазу у вигляді дрібних бульбашок. Снаряди повітря та пробки сапропелю рухаються по чергово. У пристінній плівці відбувається зворотній рух сапропелю. Це означає, що дане явище підпорядковується снарядній структурі руху повітряно-сапропелевого потоку, а його

формування відбувається за робочого тиску повітря  $P_n=100...300$ кПа, товщини шару сапропелю  $l=0,7...1,3$ м та довжини піднімального трубопроводу  $h_m=1,0...2,0$ .

Аналіз отриманих результатів показує, що всі досліджувані фактори мають суттєвий вплив на продуктивність пристрою. У всіх варіантах досліді із збільшенням тиску повітря продуктивність збільшується незалежно від глибини залягання сапропелю та довжини піднімального трубопроводу. За збільшення глибини залягання продуктивність зростає, оскільки на поклади діє сила ваги верхніх шарів. Збільшення довжини піднімального трубопроводу спричинює часткове зменшення продуктивності, проте це суттєво не впливає на робочий процес, оскільки для піднімання сапропелю з підводних родовищ із мінімальною товщиною водного дзеркала досліджуваній діапазон довжин є достатнім.

У п'ятому розділі «Результати виробничих випробувань та техніко-економічне обґрунтування засобу для добування сапропелю» встановлено

вплив технологічних та конструктивних параметрів даного засобу на його продуктивність, проведено випробування у виробничих умовах із застосуванням математичного методу планування експерименту, а також здійснено розрахунок економічної ефективності.

Для дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів засобу для добування сапропелю на його продуктивність у виробничих умовах виготовлена експериментальна установка, схема якої зображена на рис. 14. Відповідно до складу засобу для добування сапропелю слід віднести: забірний пристрій, плавзасіб з баржею, джерело енергії (генератор), повітродувна машина (компресор) та маніпулятор з глибиноміром. Дану установку оснащували забірним пристроєм, що дозволяє змінювати наступні конструктивно-технологічні параметри: кут нахилу твірної конусоподібного корпусу  $\alpha_k=15^\circ; 20^\circ; 25^\circ$ ; діаметр піднімального трубопроводу  $d=0,043\text{м}; 0,055\text{м}; 0,067\text{м}$ ; довжину піднімального трубопроводу  $h_m=1,5\text{м}; 3\text{м}; 4,5\text{м}$ ; тиск подачі повітря  $P_n=300\text{кПа}; 400\text{кПа}; 500\text{кПа}$  (рис. 15).

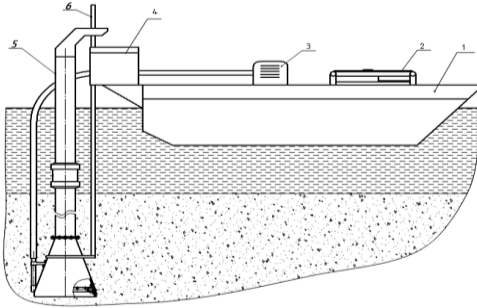


Рис. 14. Схема експериментальної установки засобу для добування сапропелю: 1 – плавзасіб; 2 – генератор; 3 – компресор; 4 – мірна посудина; 5 – забірний пристрій; 6 – глибиномір



Рис. 15. Фото пристрою для добування сапропелю та його комплектування піднімальним трубопроводом діаметром  $d=0,067\text{м}$  та змішувачем із кутом нахилу твірної: а)  $\alpha_k=15^\circ$ ; б)  $\alpha_k=20^\circ$ ; в)  $\alpha_k=25^\circ$

Проведення повнофакторного експерименту здійснювали за симетричним некомпозиційним планом реалізації експерименту Бокса-Бенкіна другого порядку. Це дозволило отримати наступне рівняння регресії:

$$Q = 3,17158 - 0,02939 \cdot l + 0,006 \cdot \alpha_k - 72,0 \cdot d - 0,00768 \cdot P_n + 0,0567 \cdot P_n \cdot d + 1,3167 \times \alpha_k \cdot d - 4,27778 \cdot d \cdot l + 6,6 \cdot 10^{-6} \cdot P_n^2 - 7,6 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_k^2 + 416,66667 \cdot d^2 + 0,03067 \cdot l^2 \quad (31)$$

Аналіз отриманих результатів підтвердив роботоздатність засобу, визначив величину впливу на продуктивність конструктивно-технологічних параметрів дозволив встановити раціональні межі цих параметрів. Запропонований засіб для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм потужністю у 2,5кВт в порівнянні із пневматичним камерним насосом V60/10 фірми «Pneuma», потужністю у 10кВт, дає змогу знижувати приведені затрати на 20,5%. За даних енергетичних витрат продуктивність розробленого засобу досягає  $Q=0,9...1,1\text{кг/с}$  сапропелю природної вологості ( $W=90...85\pm 1\%$ ), із використанням піднімального трубопроводу довжиною  $h_m=3,0...4,5\text{м}$ , кути нахилу кінцевого корпусу  $\alpha_k=25^\circ$ , та робочому тиску повітря  $P_n=500\text{кПа}$ .

## ВИСНОВКИ

1. У дисертації представлено теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладної задачі, яка полягає у добуванні сапропелю природної вологості шляхом формування повітряно-сапропелевої суміші із подальшим підніманням на надводну поверхню. Використання запропонованого забірної пристрою для добування сапропелю, розроблених методів розрахунку його параметрів і режимів роботи дає можливість зменшити енергозатрати на добування сапропелю та зневоднення при отриманні добрих на його основі, що удосконалює технологію їх виробництва.

Дослідження технологічного процесу добування сапропелю із застосуванням пневматичного забірної пристрою дозволило розкрити його фізичну суть і теоретично обґрунтувати доцільність використання конічного змішувача та виявити напрями подальшого його удосконалення.

2. Розроблена математична модель руху повітряного потоку у середовищі сапропелю. Встановлено, що доцільнішим є горизонтальне розташування осей вихідних сопел кільцевого напірного повітропроводу. При цьому максимальне проникнення повітряного потоку в сапропель вологістю  $W=95\pm 1\%$ , за тиску нагнітання  $P_n=500\text{кПа}$  досягає  $0,08\text{м}$ , а для сапропелю із  $W=90\pm 1\%$ , даний показник складає  $0,055\text{м}$ . Також встановлено, що охоплення повітряного потоку конічним корпусом забезпечуватиметься за кута нахилу твірної конуса у межах  $\alpha_k=20\dots 30^\circ$ .

3. На основі теоретичних досліджень технологічного процесу добування сапропелів виведені аналітичні залежності для визначення продуктивності забірної пристрою. Отримана залежність максимальної теоретичної продуктивності пневматичного забірної пристрою вказує на те, що добування сапропелю слід вести із глибини у межах  $H=3\dots 5\text{м}$  при тиску подачі повітря  $P_n=400\dots 500\text{кПа}$ . Встановлено, що для забезпечення формування у конічному змішувачі забірної пристрою стійкого снарядного режиму руху повітряно-сапропелевої суміші його висота повинна знаходитись у межах  $h_k=0,18\dots 0,32\text{м}$ , кут нахилу твірної корпусу –  $\alpha_k=20\dots 30^\circ$ , діаметр вхідного та вихідного отворів –  $D_0=0,3\dots 0,4\text{м}$  та  $D_g=0,09\dots 0,14\text{м}$  відповідно.

4. Встановлено, що зольність сапропелю озера Зяцьке знаходиться у межах  $A^c=20\dots 33\%$ , і він належить до органічного типу. Виявлений чіткий вплив глибини залягання на вологість, зольність та об'ємну масу сапропелю вказує на те, що найбільш цінні поклади за вмістом органічної речовини знаходяться на глибині понад  $3\text{м}$ . Тому для досягнення максимального ефекту від добутих покладів слід починати їх розробку із даної глибини.

5. Досліджено, що в'язкість сапропелю вологістю  $W=90\pm 1\%$ , зменшується із зростанням швидкості деформацій зсуву у межах  $\eta=135,52\dots 1,98\text{Па}\cdot\text{с}$  за гідростатичного тиску  $P_n=200\text{кПа}$ . Особливо значний вплив на в'язкість сапропелю чинить зміна швидкості деформацій зсуву у межах  $u=0,005\dots 0,2\text{м/с}$ . Експериментальні дослідження траєкторії руху повітряного потоку у в'язких рідинах підтвердили адекватність запропонованої математичної моделі розглядуваного процесу. Розбіжність між експериментальними та теоретичними значеннями не перевищує  $25\%$ .

6. Встановлено, що за умовами робочого тиску подачі повітря  $P_n=100\dots 300\text{кПа}$ , товщини шару сапропелю вологістю  $W=90\dots 85\pm 1\%$ , з-під якого ведеться добування  $l=0,7\dots 1,3\text{м}$  та довжини піднімального трубопроводу  $h_m=1,0\dots 2,0\text{м}$  спостерігається снарядний режим руху висхідного повітряно-сапропелевого потоку.

7. Проведені лабораторно-виробничі випробування підтвердили доцільність застосування розробленого пневматичного забірної пристрою для добування сапропелю. Продуктивність засобу для добування сапропелю природної вологості  $W=90...85\pm 1\%$ , із пневматичним забірним пристроєм досягає  $Q=0,9...1,1\text{кг/с}$  за затрат потужності електричної енергії у  $2,5\text{кВт}$  при робочому тиску повітря  $P_n=500\text{кПа}$ , довжині і діаметрі піднімального трубопроводу відповідно  $h_m=3,5...4,5\text{м}$ ,  $d=0,09...0,14\text{м}$  та куті нахилу твірної конічного корпусу  $\alpha_k=25^\circ$ .

8. На основі комплексу теоретичних і експериментальних досліджень розроблено нову конструкцію засобу для добування сапропелю і встановлено його раціональні конструктивно-технологічні параметри. Запропонована методика процесу руху повітряного потоку в середовищі сапропелю і визначення продуктивності процесу. Розробки по темі дисертаційної роботи захищені трьома патентами України на корисні моделі. Окремі результати досліджень впроваджені на ПАТ «Ковельсьільмаш». Розрахунковий річний економічний ефект становить  $9243,52\text{грн}$ .

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ, ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях*

1. Tsiz' I. Experimental research of working process of pneumatic intake device for sapropel extraction / Tsiz' I., Khomych S. // INMATEH – Agricultural Engineering. – Vol. 40, No. 2/2013. p. 67-72.

2. Хомич С.М. Дослідження пневматичного забірної пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич, І.Є. Цизь // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. – Вип. 18. – Луцьк, 2009. – С. 499-503.

3. Хомич С.М. Дослідження продуктивності пневматичного забірної пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич, І.Є. Цизь // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. - Вип. 20. – Луцьк, 2010. - С. 355-361.

4. Хомич С.М. Дослідження коефіцієнта динамічної в'язкості органічного сапропелю / С.М. Хомич, І.Є. Цизь, М.І. Коробка // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. - Вип. 24. – Луцьк, 2013. – С. 404-412.

5. Хомич С.М. Моделювання процесу руху бульбашки повітря у середовищі сапропелю / С.М. Хомич // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, вип. 42 ч. 2. – Кіровоград, 2012. – С. 147-152.

6. Хомич С.М. Фізична модель пневматичного пристрою (ерліфта) для добування сапропелю / С.М. Хомич, І.Є. Цизь, С.Б. Артинюк // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. статей. - Вип. 21. – Т. II – Луцьк 2011. – С. 166-172.

7. Цизь І.Є. Результати експериментальних досліджень продуктивності пневматичного забірної пристрою для добування сапропелю / І.Є. Цизь, С.М. Хомич // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, вип. 39. – Кіровоград, 2009. – С. 418-423.

8. Хомич С.М. Обґрунтування теоретичної продуктивності пневматичного (ерліфтного) забірної пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич // Промислова гідраліка і пневматика. Вип. 3(37). Вінниця, – 2012. – С. 95-96.

9. Хомич С.М. Дослідження фізичних властивостей сапропелю / С.М. Хомич, І.Є. Цизь // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. статей. - Вип. 26 – Луцьк, 2013. – С. 124-134.

10. Хомич С.М. Дослідження закономірності зміни об'ємного газомісту за висотою забірної пристрою засобу для добування органічного сапропелю /

С.М. Хомич // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, вип. 43 ч. 2. – Кіровоград: 2013. – С. 292-297.

#### *Патенти*

11. Пат. 39044 Україна, МПК E02F 3/08. Забірний пристрій / Цизь І.Є., Хомич С.М.; заявник та патентовласник Луцький НТУ. – №u200810917; заявл. 05.09.2008; опубл. 26.01.2009, Бюл. №2.

12. Пат. 51535 Україна, E02F 3/08. Забірний пристрій / Хомич С.М., Цизь І.Є.; заявник і патентовласник Луцький НТУ. – №u200913475; заявл. 24.12.2009 опубл. 26.07.2010, Бюл. №14.

13. Пат. 72008 України, МПК E02F 3/08. Забірний пристрій / Хомич С.М.; заявник і патентовласник Луцький НТУ. – №u201112474; заявл. 24.10.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. №15.

#### *Матеріали і тези конференцій*

14. Хомич С.М. Дослідження пневматичного забірного пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич, І.Є. Цизь / Тези XXIII-ої науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу «Актуальні проблеми та перспективи науки і виробництва». Луцьк, 2008. – С. 160.

15. Хомич С.М. Удосконалення технологій добування сапропелів / С.М. Хомич // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми розвитку регіональних АПК». – Луцьк, 2011. – С. 254-255.

16. Цизь І.Є. Результати експериментальних досліджень робочого процесу пневматичного забірного пристрою для добування сапропелю / І.Є. Цизь, С.М. Хомич // Тези XXV-ої науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу «Актуальні проблеми та перспективи науки і виробництва» (технічний напрямок). – Луцьк, 2010. – С. 176-177.

17. Цизь І.Є. Класифікація засобів добування сапропелю / І.Є. Цизь, С.М. Хомич // Тези XXVI науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу «Актуальні проблеми та перспективи науки і виробництва» (технічний напрямок). – Луцьк, 2012. – С. 146-147.

18. Хомич С.М. Результати експериментальних досліджень робочого процесу пневматичного забірного пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич // Матеріали XX-ої міжнародної науково-технічної конференції «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві». – Глеваха, 2012 – С. 130-131.

19. Хомич С.М. Порівняльна ефективність пневматичних пристроїв для добування озерних сапропелів / С.М. Хомич, І.Є. Цизь // Матеріали IX-ої міжнародної наукової конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки», вип. 1. – Кіровоград, 2013. – С. 50-52.

#### **АНОТАЦІЯ**

Хомич С.М. Обґрунтування параметрів забірного пристрою засобу для добування сапропелю. – На павах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Тернопіль, 2014.

Робота присвячена підвищенню ефективності отримання сапропелевої сировини шляхом добування покладів природної вологості пневматичним способом, на основі обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів

забірного пристрою засобу для добування сапропелю та з урахуванням його фізико-механічних властивостей. Теоретично досліджено процес руху повітряного потоку в середовищі сапропелю; обґрунтовано об'ємну продуктивність засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм; встановлено закономірності зміни об'ємного газовмісту за висотою корпусу, удосконалено конструктивно-технологічні параметри забірною пристрою за допомогою яких формується снарядний режим роботи.

Ключові слова: сапропель, забірний пристрій, властивості, бульбашка, продуктивність, тиск, повітря, газоміст, потік, параметри.

## **АННОТАЦІЯ**

Хомич С.Н. Обоснование параметров заборного устройства средства для извлечения сапропеля. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.11 - машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. - Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя, Тернополь, 2014.

Работа посвящена повышению эффективности получения сырья сапропеля путем добычи залежей естественной влажности пневматическим способом, на основе обоснования конструктивно-технологических параметров заборного устройства, средства для извлечения сапропеля с озерных залежей и с учетом их физико-механических свойств. Теоретически исследовано процесс движения воздушного потока в среде сапропеля; обосновано объемную производительность средства для извлечения сапропеля с пневматическим заборным устройством; установлены закономерности изменения объемного газосодержания по высоте корпуса (смесителя), усовершенствовано формирования снарядного режима работы устройства и его конструктивно-технологические параметры.

Экспериментально исследованы естественную влажность, зольность и объемную массу сапропеля озера Зяцкое. Установлено эмпирические зависимости для определения этих свойств с глубиной их залегания. Определен коэффициент динамической вязкости этого же сапропеля. Исследованы формы потока воздуха, движущихся в жидкостях повышенной вязкости, которые образуются за счет