

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ХОМИЧ СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 631.3:621:695:553:973(043.3)

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

05.05.11 – Машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:

Цизь Ігор Євгенович

кандидат технічних наук,

доцент

ЛУЦЬК 2014

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
<b>РОЗДІЛ 1. Сучасний стан питання та задачі дослідження.....</b>	<b>11</b>
1.1. Механізм впливу сапропелю на родючість ґрунтів та особливості його використання.....	10
1.2. Загальна характеристика та огляд досліджень властивостей сапропелю.....	17
1.3. Аналіз конструкцій засобів та пристроїв для добування сапропелю.....	24
1.4. Аналіз теоретичних досліджень забірних пристроїв.....	37
1.5. Висновки до розділу 1 і задачі дослідження.....	44
<b>РОЗДІЛ 2. Теоретичні передумови обґрунтування параметрів забірною пристрою засобу для добування сапропелю.....</b>	<b>46</b>
2.1. Загальна методика дослідження.....	46
2.2. Обґрунтування конструктивної схеми забірною пристрою засобу для добування сапропелю.....	48
2.3. Дослідження робочого процесу забірною пристрою.....	51
2.4. Моделювання процесу руху повітряного потоку в середовищі сапропелю.....	57
2.5. Обґрунтування теоретичної об'ємної продуктивності забірною пристрою засобу для добування сапропелю .....	71
2.6. Дослідження закономірності зміни об'ємного газовмісту за висотою змішувача забірною пристрою.....	76
2.7. Висновки до розділу 2.....	79
<b>РОЗДІЛ 3. Програма і методика проведення експериментальних досліджень.....</b>	<b>81</b>
3.1. Програма експериментальних досліджень.....	81
3.2. Прилади, обладнання та апаратура для проведення досліджень.....	82
3.3. Методика відбору зразків сапропелю.....	87
3.4. Методика визначення природної вологості сапропелю.....	88
3.5. Методика визначення зольності покладів.....	89
3.6. Методика визначення об'ємної маси сапропелю.....	90

3.7. Методика визначення в'язкості сапропелю.....	91
3.8. Методика дослідження траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості.....	94
3.9. Методика дослідження продуктивності забірною пристроєм для добування сапропелю і структури потоку двохкомпонентного середовища у висхідній течії корпусу та підіймального трубопроводу.....	97
3.10. Висновки до розділу 3.....	102
<b>РОЗДІЛ 4. Результати експериментальних досліджень.....</b>	<b>103</b>
4.1. Результати визначення природної вологості органічного сапропелю....	103
4.2. Результати визначення зольності органічного сапропелю.....	104
4.3. Результати визначення об'ємної маси органічного сапропелю.....	107
4.4. Результати дослідження в'язкості органічного сапропелю.....	109
4.5. Результати дослідження траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості.....	115
4.6. Результати дослідження продуктивності забірною пристроєм для добування сапропелю і структури потоку двохкомпонентного середовища у висхідній течії корпусу та підіймального трубопроводу.....	125
4.7. Висновки до розділу 4.....	128
<b>РОЗДІЛ 5. Результати виробничих випробувань та техніко-економічне обґрунтування засобу для добування сапропелю.....</b>	<b>130</b>
5.1. Методика лабораторно-виробничих випробувань засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм.....	130
5.2. Результати лабораторно-виробничих випробувань засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм.....	135
5.3. Розрахунок економічної ефективності.....	143
5.4. Висновки до розділу 5.....	146
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>147</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>150</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>164</b>

## ВСТУП

На території України розташована значна кількість озер, котловини яких заповнені сапропелями, переважно органічного типу, які є цінним матеріалом для підтримання та відновлення родючості ґрунтів. З кожним роком процеси накопичення сапропелів у цих водоймах помітно прогресують аж до перетворення озер на болота. Тільки на території Західного Полісся України таких водойм є більше 80, та з року в рік їх кількість зростає. Прогресуючі процеси евтрофії в водоймах вимагають вживання невідкладних заходів із протидії даному явищу шляхом добування сапропелю, а сільськогосподарські угіддя в свою чергу потребують якісних органічних добрив.

Враховуючи те, що останнім часом різко загострилася проблема забезпечення сільського господарства України якісними органічними добривами, перспективним напрямком забезпечення органо-сировинної бази держави є розробка власних родовищ сапропелю.

Розробка та використання сировини з місцевих озерних родовищ дасть змогу вирішити одну з основних причин зменшення обсягу та якості сільськогосподарської продукції – зниження продуктивності ґрунтів, через погіршення їх якісних показників. А правильний вибір технології добування даної сировини значно знизить енерговитрати на зневоднення, переробку і виготовлення добрив.

Запаси сапропелю тільки на території Волинської області становлять більше 100млн. тон, з перерахунку на 60%-ву вологість, що дає змогу їх довготривалого застосування як у натуральному вигляді, так і в складі сумішей добрив при внесенні в ґрунт та вирощуванні сільськогосподарських культур.

**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 багатогранним 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 органічно-мінерального складу на урожайність наступних культур із застосування науково-обґрунтованих сівозмін.

На основі вищесказаного слід відмітити, що сапропель являється екологічно чистою органічно-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 забірною 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 забірною 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 забірної 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 забірної 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 забірним пристроєм.

**Предмет дослідження** – встановлення взаємозв'язку між основними параметрами пневматичного забірної 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 багатофакторного 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 забірною 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 забірною пристрою для добування сапропелю передані ПАТ «Ковельсьільмаш», 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 забірною пристрою [11, 12], обґрунтовано його робочий процес [6, 16, 17] і економічну ефективність [19]. Проведено планування й реалізацію експериментальних досліджень забірною 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.

## РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1. Механізм впливу сапропелю на родючість ґрунтів, та особливості його використання

Серед існуючих факторів, що сприяють формуванню високого врожаю сільськогосподарських культур з належними якісними показниками, головна роль належить родючості ґрунтів, яка є основою сільськогосподарського виробництва.

Негативне явище зниження родючості ґрунтів відбувається під впливом наступних процесів: виснаження ґрунту (зменшення запасів гумусу та поживних речовин внаслідок неправильного обробітку та внесення добрив тощо); втома ґрунту (накопичення в ньому різних токсичних елементів, викликаних невірними сівозмінами, надлишком раніше внесених хімічних засобів тощо); антропогенна деградація (ерозія викликана людською діяльністю, винесення дрібнозему з урожаєм коренебульбоплодів) і т.д. Внаслідок нераціонального збирання урожаю з кожного гектара ріллі щороку виноситься понад 700 кг поживних речовин [20, 18, 49].

В результаті наведених процесів значно зменшується вміст гумусу. За 110 років (1881-1991) в Україні він знизився майже на третину (з 4,2 до 3,2%). За останніми даними цей показник знизився до 3,0% і втрати продовжують зростати [20, 18, 49, 130]. Через зниження родючості ґрунту також змінюється гранулометричний та хімічний склад, структура, знижується його продуктивність.

Проте родючість ґрунту має здатність відтворюватись, поліпшуючи сукупність властивостей. Заходи щодо підвищення продуктивності земель та їхньої охорони дуже різноманітні й повинні здійснюватись комплексно. Такі заходи являються основою гумусово-акумулятивного процесу, як єдиної системи, що взаємно доповнюють одна одну і посилюють дію всіх інших.

Одним із основних заходів збереження та підвищення родючості ґрунтів є науково обґрунтована система удобрення.

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. Для даного регіону великим резервом підвищення родючості ґрунтів є використання у якості органічних добрив сапропелів [130].

Сапропель – (в перекладі з старогрецької, „мул що гниє”) це геологічні органічні природні відклади прісноводних водойм (зокрема озер). Вихідним матеріалом відкладів є відмерлі залишки водних організмів і продуктів їх розкладу: водоростей, риб, тварин, комах а також інших решток та решток які потрапляють до води з суші. Сапропелеві відклади формуються при недостатній кількості кисню, або за повної його відсутності [42, 43, 44, 74, 119, 130, 134].

В натуральному вигляді сапропелі (кремнеземний, карбонатний, органічний, змішаний) виступають в якості саме органічних добрив, які в свою чергу, в орному горизонті, є основою відтворення гумусу, енергетичним матеріалом для мікроорганізмів, суттєвим джерелом елементів живлення рослин і важливим засобом регулювання всіх агрономічно-цінних властивостей ґрунту. Численні дослідження, проведені в різних природнокліматичних зонах близького і далекого зарубіжжя свідчать про те, що саме озерні відклади, як правило, вдосконалюють елементи родючості ґрунтів та володіють ними [20, 130, 133].

До факторів, що впливають на родючість ґрунту відносять ряд елементів, які О. М. Грінченко зобразив у вигляді шестикутника. Всі вони зв'язані між собою і утворюють єдине ціле (рис. 1.1).

Компоненти, які одночасно впливають на всі фактори життя, розвитку і росту рослин задовільняють їх всіма необхідними умовами, дефіцитними поживними речовинами, а також водою, біотичним та фізико-хімічним

середовищем, формують мікробіологічну активність та розширене відтворення родючості ґрунту – містяться у сапропелі.

На основі відомих досліджень виконаємо аналіз механізму впливу сапропелів на родючість ґрунту за наведеною схемою (рис. 1.1).

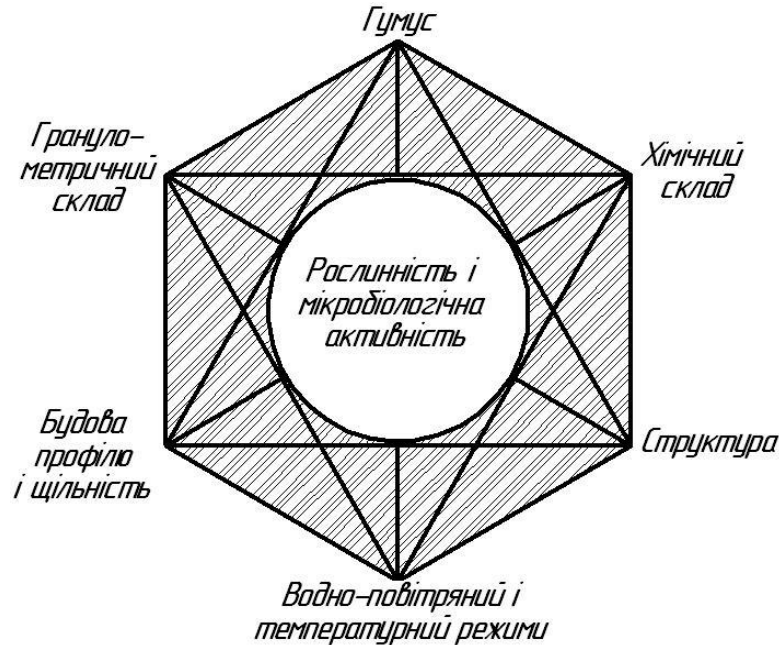


Рис. 1.1. Природні фактори родючості ґрунту (за О. М. Грінченко)

Різноманітність складових частин ґрунту дуже велика і містить низку компонентів, які взаємодіють між собою. Головна роль у сукупності цих елементів належить гумусу, як основному чиннику родючості.

Джерелом гумусу є органічні рештки вищих рослин, мікроорганізмів і тварин, що живуть у ґрунті. Сапропелі являються також продуктом розкладу органічних решток, рослин, тварин і інших речовин, а також до їх складу входять гумусові частинки, які потрапляють до води з суші через вітрову та водну ерозії. Тому під час внесення в ґрунт, як у натуральному вигляді так і у складі компостів, сапропель являється цінним матеріалом, що доповнює, вдосконалює та відтворює склад органічної частини якісних гумусових речовин, та забезпечує швидку активізацію процесу утворення гумусу в ґрунті. Внаслідок цього гумус разом із сапропелем формує єдиний компонент для покращення родючості орного шару.



Вміст органічної речовини у сапропелі залежить від його типу і коливається у межах від 15 до 94,3% на суху речовину [129]. У цьому середовищі протікають біо-фізико-хімічні процеси перетворення органічних залишків в специфічні різнозбарвлені органо-мінеральні сполуки, які перебуваючи у капілярно-колоїдно згуслому стані, визначають агрономічну цінність гумусу, а через їх сукупність з ґрунтом – його родючість [18]. Оскільки до складу сапропелю входять практично всі елементи живлення рослин, а також ферменти, антибіотики, вітаміни, то утворюється певний резерв поживних і фізіологічно активних речовин.

Для різних генетичних горизонтів ґрунтів характерні певні форми структури. Але особливо важлива є грудкувато-зерниста структура [20]. Змішування сапропелів з ґрунтом формує сприятливу структуру тобто окремоті (агрегати, грудки) різної величини, форми, якісного складу. Сапропель складається з окремих розмірних груп частинок (фракцій). У фракціях в діапазоні розмірів 0,01...0,001 мм знаходиться найцінніша частина добрив: окиси заліза, алюмінію, марганцю, каолін, фосфати і інші, які володіють пластичністю, липкістю, цементуючими властивостями, здатністю набухати. Такі властивості сапропелю у поєднанні з ґрунтом, особливо піщаним, утворюють саме грудкувато-зернисту структуру і сприятливий гранулометричний склад, який є найкращою і найефективнішою складовою для росту і життєдіяльності рослин сільськогосподарських культур [20, 129, 130].

Значення вмісту мулистої фракції у формуванні зв'язності ґрунту показують, що зв'язністю володіють лише мулисті частинки. Кульки або призми сформовані у вологому стані із всіх груп механічних елементів крім мулу, після висихання розсипаються, або самі по собі, або від найменшого навантаження. Лише досягнувши подрібнення 0,001 мм частинки зразу стрибкоподібно набувають максимальної зв'язності [20, 101, 130].

Таким чином сапропель забезпечує структуроутворення ґрунту та формування гранулометричного складу, що відіграє значну роль у формуванні

рослинної і мікроорганічної активності родючості ґрунту та сприяє розвитку мікроорганізмів [16].

Також для сапропелю характерна коагуляційна здатність, тобто при взаємодії двох колоїдних частинок, які мають протилежні заряди відбувається взаємна коагуляція (з'єднання колоїдів гумусу та колоїдів сапропелю) у пористі зерна, а вони в свою чергу у суцільну пастоподібну речовину, що дуже важливо для структуроутворюючої ролі вказаних фракцій. Чим більше у ґрунті сапропелю з гуміновими і фульвокислотами за наявності кальцію, тим агрегати ґрунту пористіші і вологостійкіші. Вони не розчиняються у воді і мало руйнуються під час оранки.

З вище перерахованого випливає, що гранулометричний склад ґрунту, який визначає його структуру, залежить від поєднання його з іншими частинками, які представлені органічними та мінеральними зернами, найбільша кількість яких знаходиться саме у сапропелях. Мулисті фракції сапропелю містять значну кількість гумусу та елементів живлення для рослин, покращують структуру та збільшують якісний гранулометричний склад.

Важливим параметром ґрунту є будова його профілю, а отже і щільність та пористість. В результаті високої щільності ґрунту зменшується вміст вологи та елементів живлення в одиниці об'єму, погіршується проростання насіння, обмежується ріст коренів зменшується доступність вологи та забезпеченість повітрям.

Сприятливі умови для сільськогосподарських культур складаються тоді, коли простір пор гармонійно розподілений і містить достатню кількість вологи та повітря. Саме із збільшенням в ґрунті органічних добрив формується середовище структурних крупних і дрібних пор [18, 49].

Верхні горизонти ґрунту мають меншу щільність –  $0,8-1,2\text{г/см}^3$ , ніж нижні –  $1,3-1,6\text{г/см}^3$ . Ця величина залежить від мінералогічного та гранулометричного складу ґрунту, його структурного стану, вмісту органічної речовини, обробітку тощо. А.С. Меєровський, Г.В. Виновець досліджували тенденції зміни щільності складу ґрунту у верхньому шарі під впливом усіх

органічних добрив. Дослідженнями, які були проведені на дерново-підзолистих ґрунтах, на глибинах 20, 25, 30 см встановлено, що внесення сапропелів та сапропеле-гноєвих компостів у співвідношенні (1:1) у середніх та максимальних дозах помітно знижує щільність ґрунту на всіх трьох досліджуваних глибинах. Пояснюється таке зниження механічною розпушувальною дією добрив, зумовленою нижчою щільністю їх твердої фази та більш низькою об'ємною масою. У зв'язку із зниженням щільності складу відповідно збільшується і пористість ґрунту.

Наступним критерієм родючості ґрунту є водно-повітряний і температурний режим. Вплив сапропелів та сапропелевих добрив на ці критерії полягає в наступному. При внесенні сапропелів в ґрунт спостерігається сприятлива його дія на водно-фізичні властивості, зокрема, збільшення повної та капілярної вологості, вологоутримуючої властивості та вологості верхнього горизонту. Дослідженнями [74, 130, 127] встановлено, що діапазон зміни водно-фізичних властивостей ґрунту залежить від кількості внесеного сапропелю та його хіміко-механічного складу. Також Є.І. Томин, А.І. Фомин у експериментальних дослідженнях виявили позитивну дію сапропелевих добрив на водний режим ґрунту [101, 104].

Повітряеміст ґрунтів залежить від їх гранулометричного складу та ступеня структурованості. Так вчені встановили, що внесення сапропелевих добрив в дозах 50-60 т/га сприяє зростанню шпаруватості та нормальної аерації ґрунту, тобто некапілярної повітряємкості, повітряємкості міжагрегатних пор або пористості аерації, збільшує продуктивну вологість в горизонті на 0,2-0,4 г/см<sup>3</sup> [44, 84].

За результатами досліджень М.Й. Шевчука встановлено, що внесення чистого органічного сапропелю на дерново-підзолистих супіщаних ґрунтах в дозах 60-80 т/га сприяло зростанню шпаруватості та аерації ґрунту, а також збільшило в 1,6-2,0 рази продуктивну вологість в шарі 0-30 см та зменшувало на 0,6-0,4 г/см<sup>3</sup> щільність ґрунту [129, 130].

Сапропелі містять широку гамму хімічних мікроелементів та органічних сполук. Тому при внесенні сапропелю в ґрунт миттєво підвищується їх вміст. У той же час хімічний склад ґрунту являється функцією гранулометричного складу. Особливу роль у формуванні гранулометричного складу та родючості ґрунту, а також розвитку рослин відіграють хімічні мікроелементи, які знаходяться в сапропелі (азот, кальцій, кремній, фосфор, калій, цинк, молібден, кобальт, залізо і ін.). А також органічні сполуки та біологічно активні речовини ( $\alpha$ -  $\beta$ -каротин, хлорофіл, пігменти, білки, вуглеводи, вітаміни В, С, Е, амінокислоти, гумінові кислоти, фульвокислоти і ін.) [74].

Винятково важливе значення для ґрунту мають мікроорганізми. Вони беруть активну участь у процесі гумусоутворення, який за своєю природою біохімічний. Із збільшенням сапропелю в ґрунті значно підвищується вміст мікроорганізмів, численність яких знаходиться в межах від 5 тис. до 11 млн. на 1 г. сухої речовини сапропелю. Це в свою чергу значно підвищує водоповітряну проникність, шпаруватість, покращує структуру та обмін мікроелементів [16, 44, 84].

Таким чином, вплив сапропелю на родючість ґрунту є багатограним та комплексним, але особливо яскравий ефект спостерігається на піщаних і 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 врожайність наступних культур при застосуванні правильних науково обґрунтованих сівозмін [74, 119, 129, 130].

Аналіз відомих експериментальних даних показує, що 80 т сапропелю 60% вологості на суху речовину, по своїй дії і післядії еквівалентний 60 т гною підстилкового. Застосування сапропелів, як основу для компосту з гноєм підстилковим, пташиним послідом, вапном, аміачною водою тощо, а також у складі гранульованих органо-мінеральних добрив помітно збільшує врожайність та зменшує норми внесення [74, 52, 84, 119, 129].

На основі вищевикладеного слід відмітити, що сапропель являється екологічно чистою органо-мінеральною сировиною, яка вдосконалює і покращує структуру ґрунту, а також являється якісним джерелом поповнення гумусу. Дані фактори у сукупності забезпечують стійке зростання родючості ґрунту.

## **1.2. Загальна характеристика та огляд досліджень властивостей сапропелю**

Дослідженням властивостей сапропелю приділяли значну увагу Ліштван І.І., Рубінштейн А.Я., Лопотко М.З., Євдокімова Г.А., Бракш Н.І., Вімба Б.Я., Косаревич І.В., Вірясов Г.П., Дідух В.Ф., Бодак В.І., Булік Ю В. та інші [6, 7, 11, 12, 33, 34, 42, 72, 104, 108, 127, 128, 130, 106].

Серед усієї різноманітності властивостей сапропелів розглянемо лише ті, які мають суттєвий вплив на процес їх добування. До даної групи слід віднести:

- фізичні (абсолютна, відносна, природна та гігроскопічна вологість, щільність твердої фази, об'ємна маса, зольність, гранулометричний склад);
- водні (водопроникність, водопоглинання та набухання);
- механічні (пластичність, липкість, опір зсуву, в'язкість, усадка).

Специфічною особливістю сапропелю являється високе вологонасичення, тобто кількість води, яка знаходиться в його порах у природному стані. Вміст вологи у сапропелях оцінюється двома показниками: відносною  $w$  (кількість вологи в сапропелі виражена у відсотках до загальної його маси) і абсолютною  $W$  (кількість вологи в сапропелі вираженої у відсотках до сухої його маси) вологостями.

Сапропель в натуральному вигляді надмірно зволожений оскільки його природна вологість, як правило, більша за повну вологоємність. Показники вологості сапропелю змінюються у широкому діапазоні залежно від глибини залягання. Так верхній його шар (пелоген) має найбільшу абсолютну вологість 2500-3000%.

Відома наступна залежність [44] для визначення абсолютної вологості за зміною глибини залягання сапропелю від 0,5 до 12 м:

$$W = 1508 - 12h + 4,4h^2, \quad (1.1)$$

де  $h$  – глибина залягання покладів, м.

Але розраховані за даною формулою значення викликають сумніви у їх достовірності.

Гігроскопічна вологість змінюється в межах 9-11% для органічних і 5-8% для кремнеземистих та карбонатних сапропелів [44].

У дослідженнях [43] зазначається, що для сапропелів величина щільності значною мірою залежить від зольності і складу золоутворюючих речовин. Так, за однакової зольності, щільність покладів різних родовищ сапропелів може помітно різнитися. Для органічних сапропелів (зольністю до 30%) щільність знаходяться у діапазоні 1,5-1,7 г/см<sup>3</sup>; кремнеземних (зольністю 50-80%) – 1,7-2,3 г/см<sup>3</sup>; карбонатних (зольністю 45-75%) – 1,9-2,1 г/см<sup>3</sup> [43]. Згідно [44] щільність сапропелів змінюється в межах 1400-2700кг/м<sup>3</sup>. За величиною математичного сподівання, щільності сапропелів розташовуються в ряд: органічні – 1610 кг/м<sup>3</sup>, змішані – 1970 кг/м<sup>3</sup>, карбонатні – 2060 кг/м<sup>3</sup>, кремнеземні – 2240 кг/м<sup>3</sup>.

Зольність має суттєвий вплив і на інші властивості сапропелю. Сапропелеві поклади різних родовищ значно відрізняються по кількісному вмісту і складу золоутворюючих компонентів. Верхня межа величини зольного залишку (85%) прийнята умовно, нижня – складає 4-7%.

Важливим показником для розрахунку продуктивності технічного устаткування є об'ємна маса. Об'ємна маса свіжо добутих сапропелів збільшується під час висихання матеріалу (рис. 1.2.), причому для мінералізованих сапропелів ці зміни помітніші ніж для малозольних [21, 43].

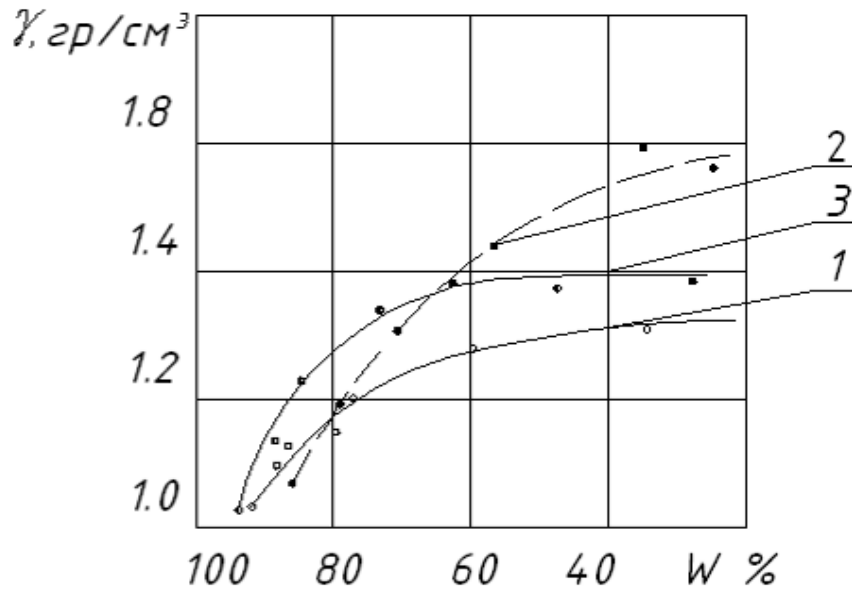


Рис. 1.2. Зміна об'ємної маси від вологості сапропелю за видами: 1 – органічний; 2 – кремнеземний; 3 – карбонатний

Для характеристики фізичного стану матеріалу використовується також об'ємна маса скелета, яка визначає вагу твердої фази сапропелю в одиниці об'єму [43, 44]:

$$\delta = \gamma / (1 + 0,01 \cdot W), \quad (1.2)$$

де  $\gamma$  – об'ємна маса сапропелю, г/см<sup>3</sup>;

$W$  – абсолютна вологість сапропелю, %.

Дослідженнями гранулометричного складу сапропелів різних родовищ займалися вчені у Білорусі та Росії - відповідно Ліштван І.І., Лопотко М.З. та Косаревич І.В. Воларович М.П. [11, 34, 74, 84]. Ними було встановлено, що середній вміст фракцій становить: > 250 мкм – 14,3%; 250-100 мкм – 19,9 %; 100-50 мкм – 12,4 %; < 50 мкм – 53,4%. Всі сапропелі містять досить мало фракцій які перевищують розмір у 250 мкм, тобто вони всі в основному тонкодисперсні. Найбільша кількість грубої фракції (>250 мкм) виявлена в органічних і карбонатних сапропелях. Середній діаметр частинок коливається у діапазоні 110-130 мкм, а умовна питома поверхня частинок – 1100-3200 м<sup>2</sup>/кг [119]. Тонка структура сапропелів обумовлена складністю і різноманіттям

біологічних і абіотичних процесів, що протікають у водоймищах, а також мікробіологічною діяльністю і деструкцією органічної речовини.

Всі сапропелі відповідно до величин математичного сподівання вмісту фракції більше 250 мкм можна розташувати в ряд: органічний, карбонатний, змішаний, кремнеземний. Для інших фракцій цей порядок порушується. Наприклад, фракцій 250-100 мкм і 100-50 мкм більше в кремнеземних ніж в органічних і карбонатних.

Мірою водопроникності матеріалів являється коефіцієнт фільтрації. Дослідження даного показника для сапропелю виявили, що він володіє фільтраційною анізотропією. Так за даними Н.В. Михальченко, коефіцієнт фільтрації, для кремнеземного сапропелю у вертикальному напрямку становить 0,0043 м/добу, а в горизонтальному – 0,0068 м/добу. Для карбонатного сапропелю ці значення відповідно становлять – 0,00086 м/добу і 0,0043 м/добу. Більше значення горизонтальної фільтрації пояснюється пошаровою будовою покладів сапропелю. Порушення структури сапропелю різко збільшує та вирівнює фільтраційну здатність у вертикальному та горизонтальному напрямках [43].

Висушений до деякого значення вологості сапропель під час контакту з водою має здатність знову поглинати вологу. Водопоглинаюча здатність сапропелю характеризується відношенням маси води поглинутої зразком за час намокання до початкової маси зразка у відсотках. Час намокання прийнято брати рівним 48 год. На величину водопоглинання в першу чергу впливають початкова вологість, вміст органічної речовини та дисперсність матеріалу. При порушенні структури сапропелю водопоглинання інтенсивно відбувається за перші 2 год., а сапропелі які висушені до повітряно-сухого стану та піддавались механічній обробці володіють дуже низькою водопроникаючою здатністю.

Під час дослідження набухання зневоднених сапропелів було встановлено, що вони активніше набухають на початковій стадії процесу, а також, чим дрібніші його частинки, тим сильніше вони набухають. Так,



частинки дрібніші 0,01 мм за однакових умов набухають в два рази більше, ніж фракції 0,1-0,05 мм [74, 72].

Вміст в сапропелях великої кількості органічної речовини істотно впливає на величину показника пластичності. Відомо, що для органічних сапропелів верхня межа пластичності коливається у межах 457-621%, нижня – 144-257%, а число пластичності – 313-426%. Кремнеземні і карбонатні сапропелі мають менші показники пластичності [65, 74].

Максимальні значення липкості сапропелів до різних матеріалів визначені на приладі Качинського за попереднього ущільнення зразків протягом 5 хв. тиском 0,1-0,3 кг/см<sup>2</sup> приведені в табл. 1.1. Для кожного виду сапропелю характерна своя оптимальна вологість, при якій досягається максимальна липкість [10, 44].

Таблиця 1.1

Значення максимальної липкості сапропелів до окремих матеріалів [43]

Сапропель	Відносна вологість сапропелю при максимальній липкості, %	Липкість, г/см <sup>2</sup>		
		пластмаса	гума	дерево
Органічний	86,46	16,4	15,6	13,0
Карбонатний	77,82	14,8	9,4	10,0
Кремнеземний	75,2	12,0	13,9	10,7

Липкість сапропелю значною мірою залежить від його дисперсності, стадії переробки та матеріалу до якого він прилипає. Чим вища дисперсність, тим вище значення липкості. Липкість перероблених сапропелів, одного й того ж зразка, вища ніж у не перероблених в межах 20-30% [43, 19].

Граничні напруження зсуву, ряд вчених, відносить до однієї з основних реологічних характеристик сапропелів [43]. Розроблені також ряд методів, які дозволяють визначити дану характеристику [125].

Метод прямого площинного зрізу дозволяє визначити коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi_0$  ( $\varphi_0$  – кут внутрішнього тертя) та зчеплення сапропелю.

Дослідження проведені Лопотко М.З. за даною методикою на приладі П 10-С дозволили отримати дані наведені у табл. 1.2 [43].

Таблиця 1.2

## Середнє значення характеристик напружень зсуву

Сапропель	Відносна вологість, %	Зчеплення, кг/см <sup>2</sup>	$tg\varphi_0$
Органічний	81...84	0,205...0,115	0,11...0,060
Кремнеземний	64...69	0,175...1,230	0,025...0,073
Карбонатний	64...71	0,383...0,107	0,135...0,098

Проводились дослідження умовного граничного напруження зсуву методом пенітрації за допомогою конічного пластоміра конструкції М.П. Воларовича та С.Н. Макарова із кутом твірних конуса  $45^0$  [43, 125]. Аналіз отриманих результатів вказує на те, що граничне напруження зсуву зменшується із збільшенням вологості і це явище найбільш інтенсивно виражене за відносної вологості 80-85% для органічного сапропелю і 70-75% для кремнеземного.

Відомі також дослідження граничного напруження зсуву сапропелю за допомогою крильчатки [7, 21]. Результати цих досліджень вказують на те, що за відносної вологості сапропелю 97% граничне напруження зсуву не залежить від величини нормального навантаження (глибини залягання покладів) і знаходиться у межах 63-65 Па. Із зменшенням вологості до 93% напруження зсуву зростає. Але суттєвого впливу зміни нормального навантаження не спостерігається, оскільки значення напруження зсуву знаходиться у межах 448-458 Па, що відповідає межах довірчого інтервалу. Такі висновки підтверджуються результатами дослідження сил зчеплення сапропелю даного типу із використанням одноштокового кулькового штампа [7, 21]. Даним методом встановлено, що для органічного сапропелю вологістю 93 % середнє значення зчеплення рівне 450,6 Па, що повністю узгоджується із наведеними вище числовими значеннями.

Також відомо, що сапропелі непорушеної структури мають більш високі граничні напруження зсуву ніж сапропелі порушеної структури. Так наприклад

після проморожування граничне напруження зсуву сапропелю зменшується на 30-60 %, а під час зневоднення воно навпаки зростає [43].

У відомих дослідженнях в'язкості сапропелів, тобто властивості чинити опір зміщенню його шарів використовували віскозиметр ротаційного типу РВ-8 [10, 43]. Результати досліджень засвідчують, що найвищою в'язкістю володіють органічні сапропелі, які за відносної вологості 92 % та температурі +15°C досягають 80 П (пуаз), або 8 Па·с, кремнеземисті відповідно не більше 36 П, а карбонатні лише 24 П. Із збільшенням вмісту сухої речовини в'язкість різко зростає і може досягати 10000 П [43]. Характерною особливістю сапропелів є зменшення в'язкості при збільшенні швидкості зсуву. Так для органічного сапропелю за швидкості зсуву 0,06 м/с в'язкість складає 94 П, а для 0,39 м/с – 26,6 П. В'язкість сапропелю, так як і у більшості рідин, зменшується із збільшенням температури. Збільшення температури від +12°C до +20°C приводить до зменшення в'язкості для органічних сапропелів у 1,3 а для кремнеземних в 1,1 рази.

Наступною характеристикою механічних властивостей сапропелів є різко виражена здатність до усадки при висиханні. Величина усадки при висиханні до гігроскопічної вологості складає 72-95 % від первинного об'єму (стан повної вологоємкості). Більшою усадкою володіють органічні сапропелі, що мають велику початкову вологість і меншу зольність.

Усадка зразка в стані повної вологоємкості може бути визначена за залежністю [43, 72]:

$$V_w = V_{\text{н\ddot{o}\ddot{o}}} (1 + \beta_v W), \quad (1.3)$$

де  $V_w$  – об'єм зразка при повній вологоємкості, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{н\ddot{o}\ddot{o}}}$  – об'єм сухого зразка, м<sup>3</sup>;

$\beta_v$  – коефіцієнт об'ємної усадки, рівний відносному зменшенню об'єму при зміні вологості на одиницю (безрозмірна величина);

$W$  – відносна вологість зразка, %.

Значення коефіцієнта об'ємної усадки залежно від типу сапропелів коливається від 0,01 до 0,028 [43, 72].

Проведений аналіз і порівняння наведених даних свідчить про невисоку достовірність окремих з них. Слід зазначити, що сапропелі одного типу із озер різних регіонів можуть значно відрізнятися властивостями, які суттєво впливають на процес розробки родовищ. Тому дослідження властивостей сапропелю необхідно проводити для кожного родовища окремо, з метою отримання достовірних результатів.

### **1.3. Аналіз конструкцій засобів та пристроїв для добування сапропелю**

Важливим критерієм вибору способу розробки покладів сапропелю повинна бути його екологічна чистота, тобто добувні роботи не повинні призводити до порушення екосистеми озера, забруднювати водовідвідні канали та прилеглі території, викликати повторну евтрофію озера. З іншої сторони, засоби добування сапропелю повинні забезпечувати мінімальну собівартість робіт, а також отримання покладів природної вологості. Тому далі наведено аналіз технологій та конструкцій забірних пристроїв, які використовуються у засобах для добування сапропелю різними способами з точки зору виконання висунутих вимог.

З аналізу літературних джерел [6, 7, 34, 42, 43, 63, 67, 90, 99, 104, 107, 130, 131] відома значна кількість технологій добування сапропелевих покладів назва яких, в більшості випадків, відповідає назві робочого органу або забірної пристрою, що входить до складу засобу для їх добування. Така сукупність співпадань не дає можливості досконало класифікувати способи добування сапропелю. Для розробки сапропелевих родовищ можуть бути використані землерийні машини, днопоглиблювальні, землечерпальні і землевсмоктувальні пристрої, грейферні, шнекові, ковшові, вакуумні, ежекторні, скреперні і інші, а також комбіновані установки. Така різноманітність способів екскавації зумовлена багатоманітністю умов залягання озерних покладів (на дні озера, під

торф'яними покладами або мінеральними осадами), хіміко-технічними властивостями, розмірами родовищ, вимогами до готової продукції і рядом інших причин [6, 7, 34, 43].

На основі аналізу та узагальнення існуючих класифікацій технологій добування сапропелю [6, 7, 43, 130, 131] нами запропонована удосконалена класифікація, що базується на принципі поділу їх за типом енергії, яка використовується для здійснення даного процесу, та видом забірних пристроїв котрі при цьому використовуються (рис. 1.3).

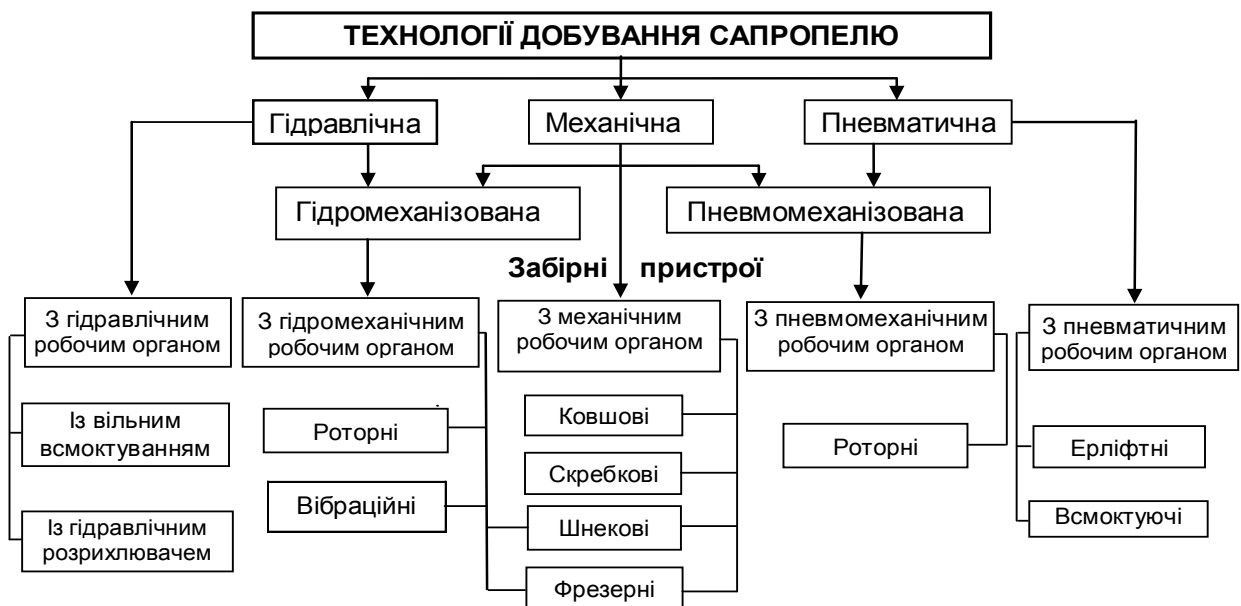


Рис. 1.3. Класифікація технологій добування сапропелів

У відомих технологіях добування озерних покладів найбільш широко використовується механічна енергія, енергія гідравлічного струменю та їх поєднання у гідромеханізованій технології. Меншого застосування набула енергія стиснутого повітря і практично не застосовується для промислових розробок пневмомеханізована технологія.

За даною наведеною класифікацією проведемо аналіз конструкцій засобів та пристроїв для добування сапропелю, як вітчизняного так і закордонного виробництва у наведеній вище поширеності їх застосування.

Ковшові забірні пристрої знайшли своє застосування у вигляді скреперного ковша для екскаватора під час добування сапропелю з під шару води. У такому випадку екскаватор розміщується на плавучому понтоні, а

добуті поклади транспортуються до берегової лінії баржею із наступним перевантаженням у наземний транспорт [130]. Таке технічне рішення дозволяє добувати поклади природної вологості та вимагає значних затрат на транспортно-перевантажувальні роботи і спричинює значне замулення води.

Використання ковшового робочого органу у складі ковшово-елеваторного пристрою [13, 37, 58, 130] дозволяє зменшити металомісткість процесу добування та забезпечує добування покладів природної вологості, але вимагає значних затрат на транспортно-перевантажувальні роботи.

Також пропонується конструкція комплексу для добування сапропелю із скребковим гнучким конвеєром, який одночасно забезпечує і транспортування покладів до берегової лінії, але характеризується значною металомісткістю [56].

Застосування профільного ковша у канатно-скреперній установці (рис.1.4) для добування сапропелю, із малих за площею водойм, дозволяє позбутись недоліків описаних вище пристроїв [7]. Проте застосування такої установки на середніх та великих озерах є економічно недоцільним.

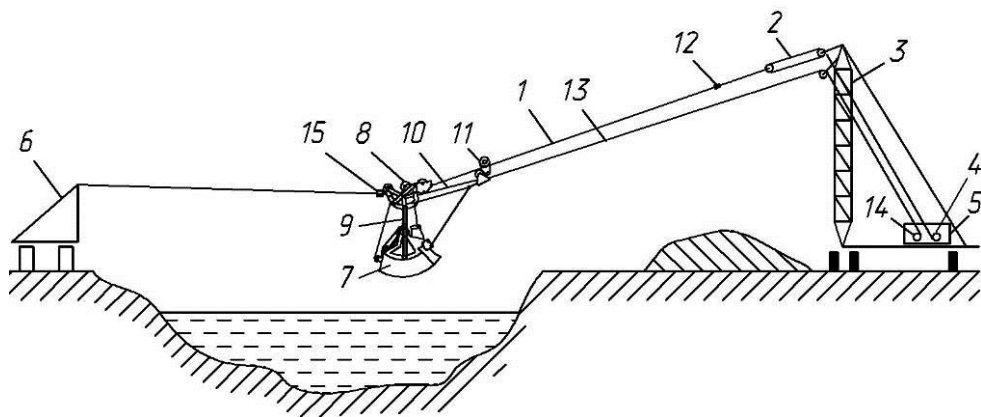


Рис. 1.4. Канатно-скреперна установка для добування сапропелю: 1 – несучий канат; 2 – блоки; 3 – велика башта; 4 – барабан; 5 – лебідки; 6 – мала башта; 7 – ківш; 8 – каретки; 9 – важелі; 10 – канат; 11 – ролик; 12, 15 – упор; 13 – тяговий канат; 14 – тяговий барабан

Використання шнекових забірних пристроїв [6, 53, 130, 131] за механічного способу добування дозволяє забезпечити неперервність процесу, а також існують конструктивні рішення, що дозволяють зневоднювати сапропель

у процесі його добування (рис. 1.5) [53, 131]. Широке впровадження таких пристроїв обмежується значною їх металомісткістю, особливо для значних глибин добування та складністю механізму приводу робочого органу.

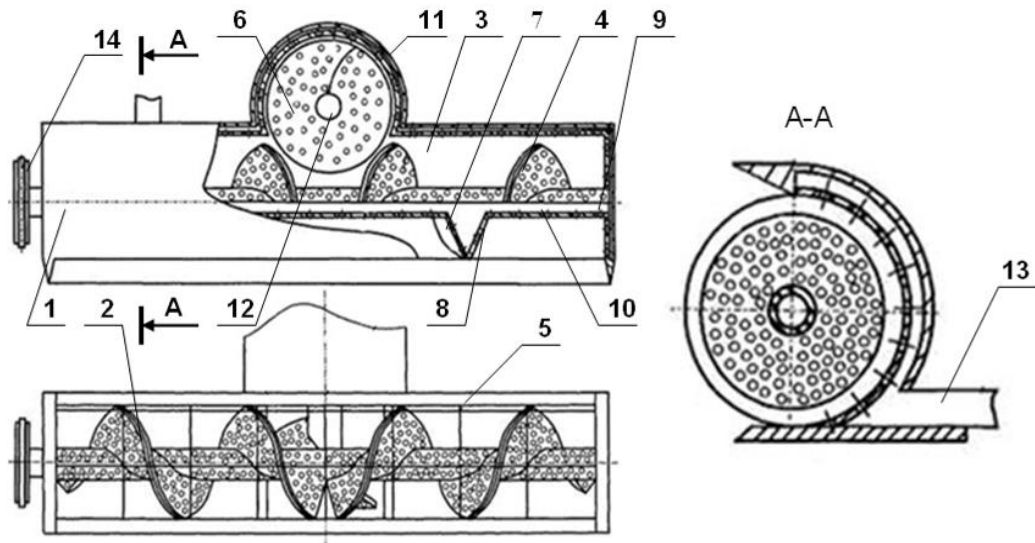


Рис. 1.5. Пристрій для добування сапропелю із шнековим робочим органом: 1 – корпус; 2, 4 – перфоровані шнеки; 3 – всмоктуюча насадка; 5 – вікно; 6 – піднімальний шнек; 7 – протирижучі пластини; 8 – ножі; 9, 10, 11, 12 – порожнини; 13 – відсмоктуючий патрубок; 14 – привод

Для добування сапропелю разом із поверхневим його шаром (пелогеном), який може містити значну кількість рослинності, розроблений фрезерний забірний пристрій (рис. 1.6) [64]. Подання сапропелю від забірною пристрою до баржі також здійснює гвинтовий конвеєр. Недоліками такого добувального засобу являються: значна металомісткість, складний механізм приводу, низька екологічність, потрапляння води у зону забору.

Отже зазначені засоби для добування сапропелю із механічними забірними пристроями лише частково забезпечують виконання необхідних вимог, вони є металомісткі та енергозатратні.

Засоби, які використовуються для добування сапропелю із використанням гідравлічної енергії можна поділити на дві підгрупи за типом забірною пристрою: із вільним всмоктуванням та із гідравлічним розрихлювачем. У першому випадку суміш сапропелю із водою (сапропелева пульпа) вільно

всмоктується через насадки різноманітної конструкції ґрунтовим насосом з поверхневого шару покладів.

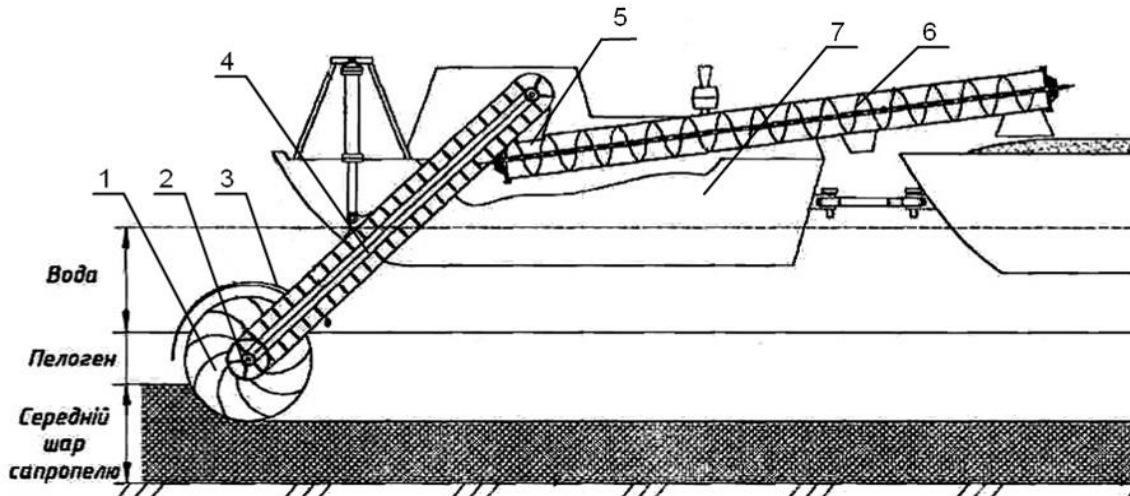


Рис. 1.6. Схема засобу для добування сапропелю із фрезерним забірним пристроєм: 1 – забірна фреза; 2 – шнек; 3 – корпус; 4 – скребковий транспортер; 5 – бункер; 6 – шнековий прес; 7 – плавзасіб

Для унеможливлення забивання забірної насадки рослинністю запропоновано ряд захисних пристроїв. Найпростіші з них передбачають використання рухомих чи нерухомих решіток або ножів з торця насадки. Такий ґрунтозабірний пристрій (рис. 1.7) містить всмоктуючу насадку 1 та шарнірно закріплену на ній рухомих решітку 3 [43]. Привод решітки здійснюється реверсивною лебідкою 2. Момент включення лебідки визначається граничним значенням розрідження у всмоктуючому трубопроводі (контролюється вакуометром).

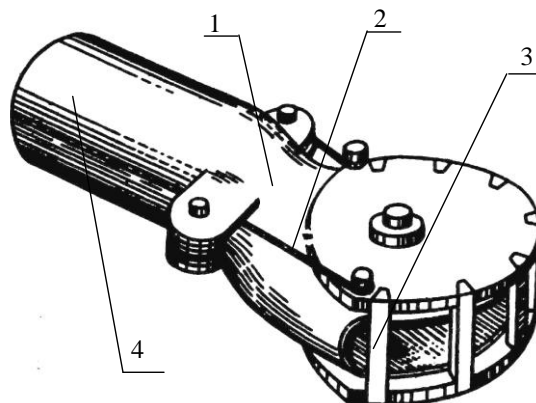


Рис. 1.7. Забірний пристрій з рухомою решіткою: 1 – вимотуюча насадка; 2 – привід решітки; 3 – рухома решітка; 4 – піднімальний трубопровід



Такий пристрій забезпечує задовільні результати під час добування малозв'язких сапропелевих покладів за траншейного способу розробки родовища. Але у випадку папільонажного способу розробки (робочий орган поперемінно переміщається з ліва на право і навпаки) даний пристрій не забезпечує бажаної консистенції пульпи. Оскільки у такому випадку лише частина всмоктуючої насадки контактує із покладами.

З метою усунення такого недоліку пропонується до використання забірний пристрій системи Антипова. (рис. 1.8) [43].

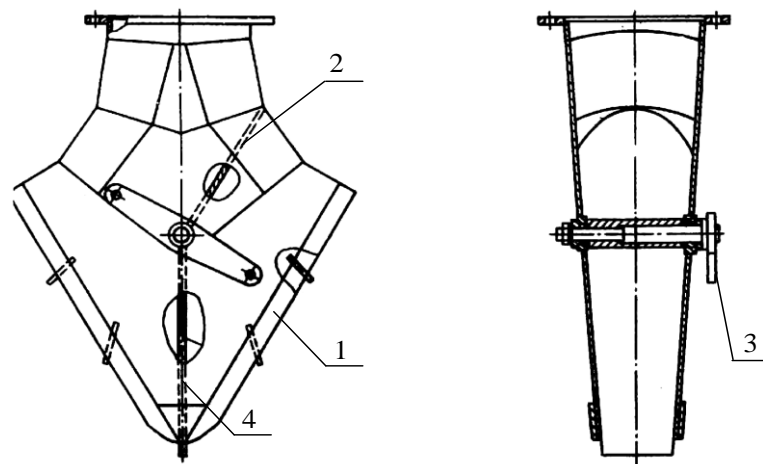


Рис. 1.8. Забірний пристрій системи Антипова: 1 – корпус; 2 – поворотна заслінка; 3 – важіль керування заслінкою; 4 – перегородка

Особливістю цього пристрою є дві робочі порожнини. При почерговій зміні напрямку руху вправо чи вліво за допомогою відкривання заслінки забезпечується захоплення пульпи тією порожниною пристрою, яка повернена в сторону пересування. Застосування такої конструкції забірної пристрою для верхнього шару сапропелю забезпечує високу консистенцію пульпи та нормальну рівномірність розробки поверхні покладів. Даний пристрій не застосовується при добуванні середніх і нижніх шарів покладів.

Розробка конструкцій забірних пристроїв, які належать до другої підгрупи, спричинена необхідністю розпушення покладів енергією гідравлічного потоку при розробці нижніх, більш ущільнених, шарів сапропелю [43, 58, 67, 70]. На рис. 1.9 представлена схема такого забірної пристрою [43].

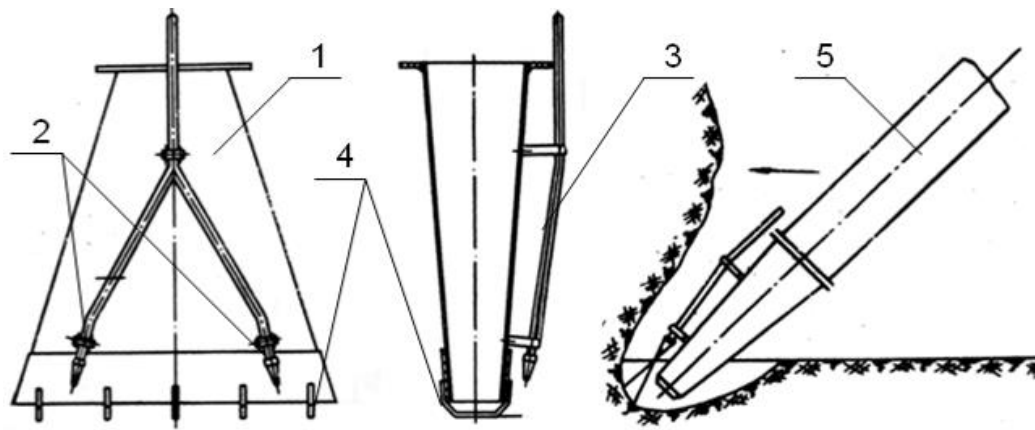


Рис. 1.9. Забірний пристрій з гідравлічним розрихлювачем: 1 – корпус; 2 – форсунки; 3 – магістраль подачі води; 4 – захисна решітка; 5 – підйомна труба

Випробування даного пристрою під час траншейного способу розробки покладів показали, що застосування гідравлічного розрихлювача забезпечує досить стійку консистенцію пульпи при середньому вмісті сухої речовини 35,2 г/л. При папільонажному способі розробки покладів, конструкція даного забірною пристрою забезпечує низьку консистенцію пульпи і тому малоефективна.

Також існує ряд конструктивних схем забірних пристроїв з гідравлічним розрихлювачем для добування корисних копалин із підводних родовищ. Дані пристрої запропоновані для спеціальних типів покладів де дозволяють покращити якість роботи (рис. 1.10) [67, 70, 89].

Таким чином гідравлічні забірні пристрої засобів для добування сапропелю мають значно простішу конструкцію у порівнянні із механічними. Використання енергії гідравлічного потоку дозволяє здійснювати забір покладів, їх транспортування до поверхні води, а також і подачу до берегової лінії та відстійників. Але необхідність подавання додаткової кількості води для розпушення середніх та нижніх шарів сапропелю призводить до значного зниження концентрації сухої речовини у добутій пульпі, тобто до значного зростання вологості добутого продукту.

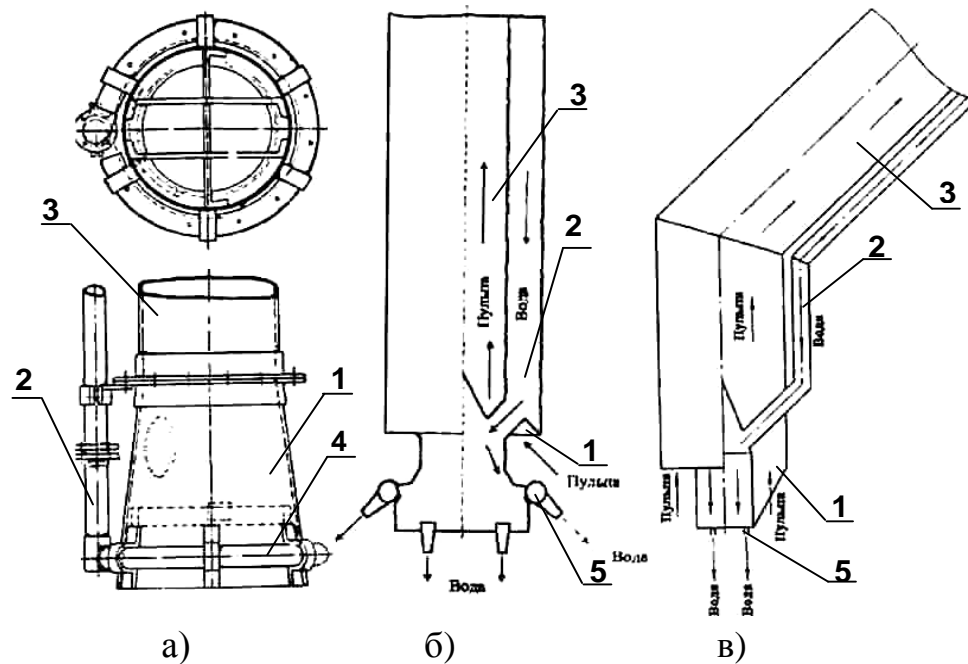


Рис.1.10. Модифікації забірних пристроїв із гідравлічним розрихлювачем: а) – з кільцево-форсунковим напірним апаратом; б, в) – з форсунковим напірним апаратом; 1 – корпус; 2 – магістраль подачі води; 3 – піднімальний трубопровід; 4 – кільцевий напірний повітропровід з форсунками; 5 – головка напірної порожнини з форсунками

Позбутись необхідності подачі додаткової води дозволяє поєднання у забірних пристроях механічної енергії та енергії гідравлічного потоку. У такому випадку відокремлення покладів від загального масиву забезпечує механічний робочий орган, а транспортування – гідравлічний потік. Значну кількість конструкцій забірних пристроїв, які працюють за наведеним принципом можна поділити на роторні, шнекові та фрезерні.

В якості типового роторного забірною пристрою можна розглянути конструкцію розроблену Е.Р. Волковим, Н.В. Дубровським, М.З. Лопотком [43]. Особливість запропонованої конструкції (рис. 1.11) полягає в наявності ріжучих елементів які мають вигляд рухомого і нерухомого ножів, та забезпечують подрібнення рослинних матеріалів. Пристрій складається з ротора з лопатями 1, бункера 2, циліндрична частина якого виконана у вигляді решітки з ножів 3. Всмоктуюча труба кріпиться до торцевої сторони бункера. Пристрій занурюється за допомогою лопатей.

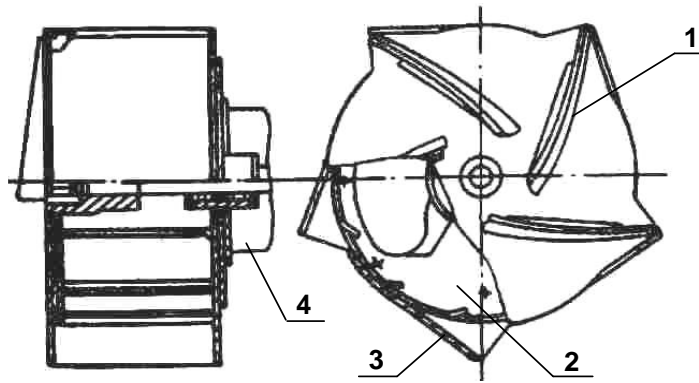


Рис. 1.11. Роторно-ковшовий ґрунтозабірний пристрій: 1 – передня лопать, 2 – ротор з ковшами, 3 – захисна решітка, 4 – всмоктуюча труба

Роторно-ковшовий пристрій забезпечує досить рівномірний забір ґрунту і дозволяє вести роботу з великими швидкостями. Він досить добре працює при розробці ущільнених сапропелевих пластів і забезпечує розпушення та добування сапропелевої пульпи консистенцією 40 – 60 г/л.

Для розробки сапропелевих покладів з великою кількістю рослинності пропонується використовувати шнеково-скреперуючі забірні пристрої з подрібнюючим апаратом і рухомим екраном (рис. 1.12). Пристрій оснащений ріжучим елементом у вигляді шнеку, що забезпечує подрібнення рослинних решток, які потрапляють у забірну частину [43, 44, 58].

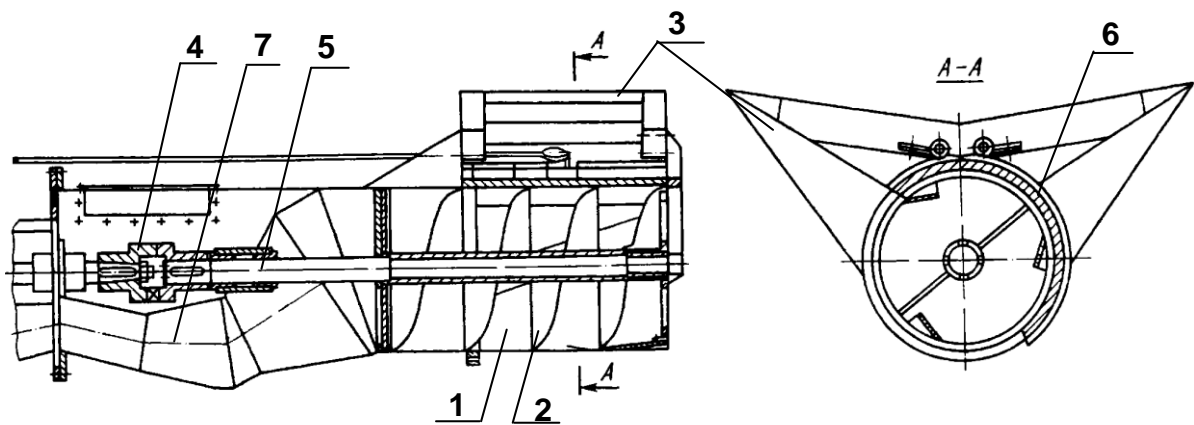


Рис. 1.12. Шнеково-скреперний забірний пристрій: 1 – корпус; 2 – шнек; 3 – рухомий екран (скрепер); 4 – муфта; 5 – вал; 6 – поворотний кожух; 7 – піднімальний трубопровід

Задовільні результати дають забірні пристрої із фрезерними забірними робочими органами [54]. Відмінностями пристрою являється присутність фрези

з набором знімних розрихлююче-подаючих і ріжучих ножів та активатора-подрібнювача (рис. 1.13). За допомогою останнього відбувається кінцеве подрібнення рослинних домішок і забезпечується додатковий напір при всмоктуванні насосу. Продуктивність такого пристрою під час роботи з сильно зарослими покладами становить  $110 \text{ м}^3/\text{год}$ .

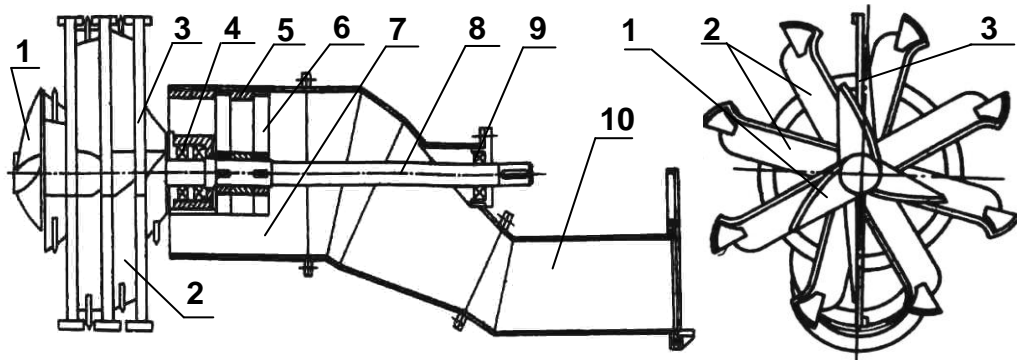


Рис. 1.13. Забірний пристрій для добування зарослих донних покладів:  
 1 – торцева фреза; 2 – ріжучий ніж; 3 – протирижучий ніж;  
 4, 9 – опора; 5 – ніж статор подрібнювач; 6 – ніж ротор подрібнювач;  
 7 – всмоктувальний патрубков; 8 – вал; 10 – піднімальний трубопровід

Отже засоби для добування сапропелів із гідромеханічним забірним пристроєм дозволяють підвищити консистенцію пульпи добутих покладів, забезпечують хорошу роботу на родовищах вкритих рослинністю. Але володіють недоліком досить складного механізму приводу робочих органів.

Розробці конструкцій пневматичних забірних пристроїв та впровадження їх під час добування сапропелю призначеного для використання в сільському господарстві не виправдано приділялось мало уваги. Адже за гідравлічних та гідромеханічних технологій добування спостерігається протиріччя, яке полягає у наступному. Для досягнення бажаної консистенції пульпи доводиться спочатку поклада насичувати водою, а потім із значними затратами часу та ресурсів проводити їх зневоднення [96]. Наявні розробки пневматичних забірних пристроїв можна згрупувати за принципом дії на ерліфтні та всмоктувальні.

Існує значна кількість конструктивних розробок ерліфтних пристроїв для

добування корисних копалин із підземних та підводних родовищ [2, 68, 69, 94, 95, 96, 97, 98]. Але лише незначна їх кількість пропонується для використання під час добування сапропелю [94, 95, 96, 97, 98]. Така особливість спричинена специфікою сапропелевих покладів, а отже і необхідністю інтенсифікації процесу утворення газорідної суміші у змішувачі ерліфта. Тому з точки зору запропонованої класифікації (рис. 1.3) такий змішувач слід розглядати як забірний пристрій. Так у конструкції ерліфтного пристрою Сукач М.К. пропонує застосовувати псевдозрідження сапропелевих покладів струменем повітря, який виходить із сопел встановлених під кутом до осі подаючого патрубку (рис. 1.14).

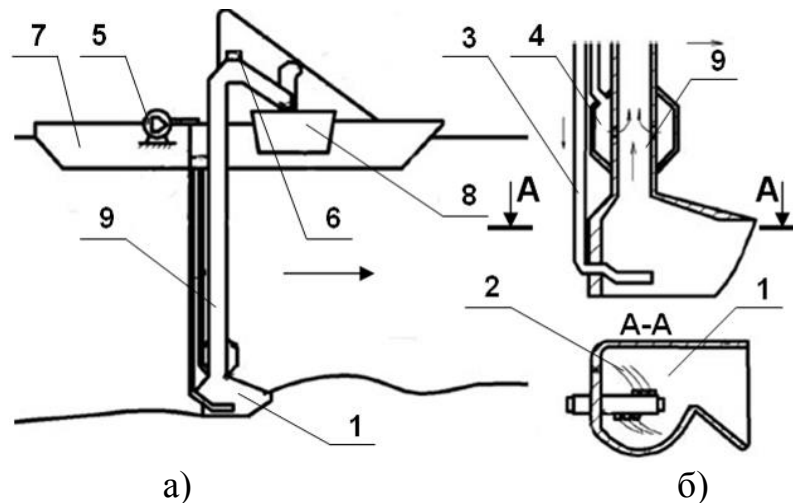


Рис. 1.14. Схема засобу для добування сапропелю а), та ерліфтного забірного пристрою б): 1 – забірник (змішувач), 2 – сопла, 3, 4 – повітропроводи, 5 – компресор, 6 – повітровідокремлювач, 7 – плавзасіб, 8 – зумпф, 9 – піднімальний трубопровід

Таке розташування сопел забезпечує утворення повітре-струменевого гвинта. Даний засіб дозволяє значно підвищити ефективність процесу завдяки збільшенню концентрації сапропелю в пульпі. Також підвищується надійність та знижується металомісткість процесу через відсутність механічних приводів та виконавчих органів. Але у той же час залишається відкритим питання забивання рослинними рештками та ефективності роботи за папільонажного способу добування.

Знайшли своє застосування під час добування сапропелів і всмоктувальні

забірні пристрої у складі пневматичних камерних насосів [55]. Такі конструктивні розробки (рис. 1.15) застосовуються у обладнанні італійської фірми „Pneuma” [99]. Особливістю роботи розглядуваного засобу є наявність двох робочих циклів: заповнення камери сапропелем та витіснення стиснутим повітрям. З метою підвищення продуктивності такий насос обладнується трьома камерами.

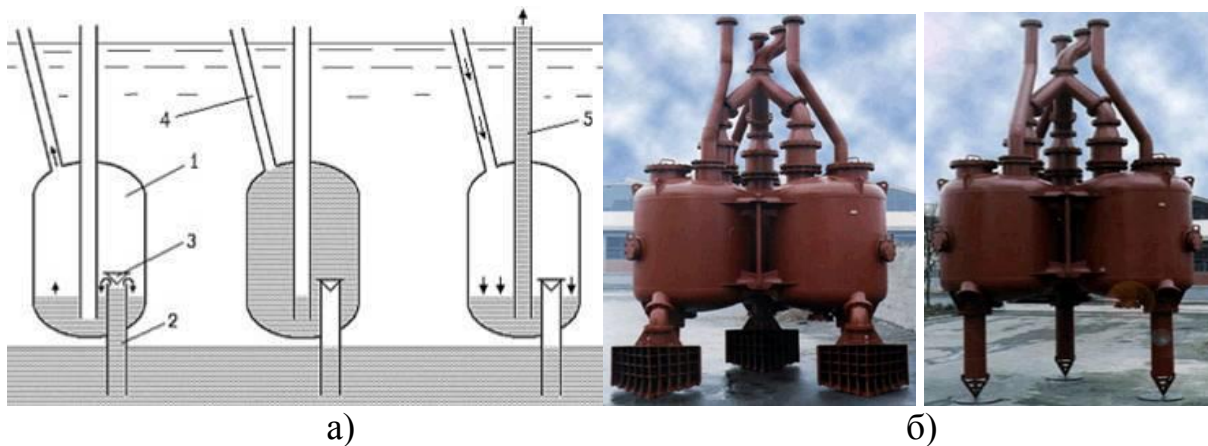


Рис. 1.15. Схема роботи а), та фото пневматичного камерного насоса б):  
1 – робоча камера, 2 – забірний пристрій, 3 – клапан; 4 – труба входу і виходу повітря, 5 – вивідний трубопровід

Для забезпечення всмоктування покладів під час добування на глибині менше 4 м використовують вакуумний пристрій. Забірний пристрій виконують або у вигляді ковша закритого решіткою (у випадку горизонтальної розробки покладів) або у вигляді решітчастого конуса (під час вертикальної розробки покладів).

Розглядувані пристрої дозволяють добувати сапропель природної консистенції та не допускають підвищення мутності води. Але у той же час навіть за відсутності механічних пристроїв даний засіб характеризується значною металомісткістю, потребує компресора із робочим тиском від 0,8 МПа та автоматичного блоку керування роботою клапанної системи. Обладнання описаними видами забірних пристроїв робить проблематичним добування покладів підвищеної в'язкості (із пониженою вологістю) та забруднених рослинними рештками.

Вирішити ряд описаних проблем дозволяють пневмомеханічні забірні

пристрої. Так обладнання ерліфтного забірною роторним вихреутворювачем дозволяє покращити його роботу на покладах підвищеної в'язкості та забруднених рослинними рештками (рис. 1.16).

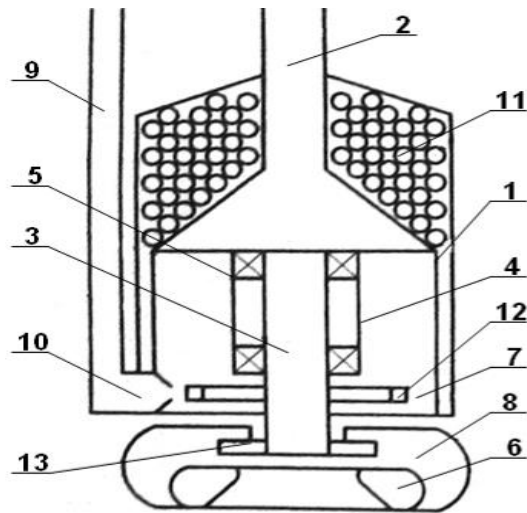


Рис. 1.16. Пневмомеханічний забірний пристрій: 1 – змішувач; 2 – піднімальна труба; 3 – падаюча труба; 4 – стакан; 5 – підшипники; 6 – турбіна; 7 – вихреутворювач; 8 – насадка; 9 – повітряний трубопровід; 10 – сопловий апарат; 11 – перфорований кожух; 12 – підживлююча камера; 13 – канал

Аналогічний ефект досягається під час використання всмоктувально-фрезерного забірною пристрою в складі пневматичних камерних насосів для добування сапропелю [99]. Але це у свою чергу ще додатково ускладнює конструкцію таких засобів.

З аналізу літературних джерел відомі конструкції і інших пневматичних забірних пристроїв які застосовуються в різних галузях промисловості і призначені для забору, подачі і транспортування різного роду сипких матеріалів [8, 24, 27, 30, 46, 71, 75, 76, 92, 105]. Так наприклад, для перевантаження зернових сільськогосподарських матеріалів (рис. 1.17, а), прибирання решток стружки у металообробних цехах (рис. 1.17, б), транспортуванні сухого цементу (рис. 1.17, в), транспортуванні чайного листя (рис. 1.17, г) і ін. Ці забірні пристрої однакові за принципом роботи, але різні за конструкцією та призначенням. У даних пристроях спільним є застосування



регулювальних механізмів для подачі повітря.

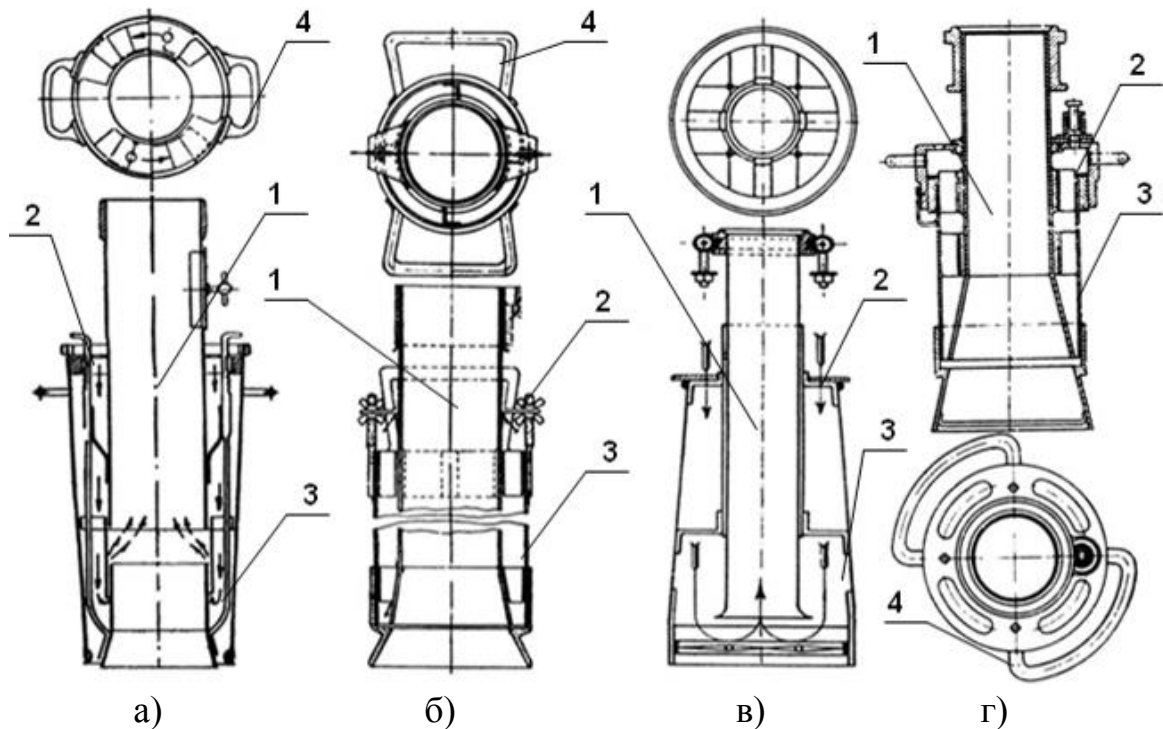


Рис. 1.17. Пневматичні забірні пристрої для сипких та пиловидних матеріалів:  
1 – засмоктуюча труба; 2 – регулювальний механізм; 3 – рухомий патрубков; 4 – ручки для підймання і перенесення

Такими чином узагальнюючи результати аналізу засобів для добування сапропелю можна зробити висновок, що з точки зору висунутих вимог найбільш перспективним слід розглядати ерліфтні установки.

#### 1.4. Аналіз теоретичних досліджень забірних пристроїв

Удосконалення конструкцій пневматичних забірних пристроїв з метою їх використання для добування сапропелів можливе лише у випадку досконалого аналізу відомих теоретичних закономірностей для обґрунтування параметрів таких забірних пристроїв.

Досягнення необхідної якості роботи забірних пристроїв, та їх експлуатації можливе лише за умови глибокого дослідження процесів, які відбуваються у подібних механізмах, або аналогах. Надзвичайно широкий діапазон галузей у яких використовуються пневматичні забірні пристрої

спонукав до появи значної кількості їх конструкцій, різноманітних досліджень та багатогранності розрахунків пов'язаних з ними. Це пояснюється вибором різних підходів для вирішення поставленої задачі і визначенням вихідних параметрів. Такими дослідженнями у плані теоретичного обґрунтування роботи пневматичних забірних пристроїв, або елементів що входять до їх складу, займались: Козориз Г.Ф., Плавинский В.И., Зенков Р.Л., Вайсон А.А., Воробьев А.А., Матвеев А.И., Носко Г.С., Шапунов М.М., Харін А.І., Спиваковський А.О., Дьячков В.К., Фролов А.Г., Пышкин В.П., Кислов Н.В., Бакшанський В.И. і інші.[8, 24, 27, 28, 30, 46, 71, 75, 91, 92, 105, 107].

При розрахунку пневматичних транспортуючих пристроїв як всмоктуючої так і нагнітаючої дії, визначають наступні їх параметри: внутрішній діаметр транспортного трубопроводу  $d_{\delta\delta}$ , необхідну витрату стиснутого повітря  $Q_n$ , повний опір в трубопроводі  $H_{r\delta\delta}$ , необхідний тиск повітродувної машини  $P_i$ , довжину транспортування  $L_{\delta\delta}$  і конфігурацію трубопроводу, а також фізико-механічні властивості вантажу, і інші параметри від яких залежить розрахунок [8, 24, 27, 30, 46, 71, 92, 107].

За даними [71] розрахункову годинну продуктивність пневмотранспортних установок відносно матеріалу залежно від експлуатаційної продуктивності розраховують з орієнтовним коефіцієнтом запасу 1,5.

Залежно від розміру частин вантажу, його щільності та дальності транспортування визначається фактична масова концентрація суміші

$$\mu_{\bar{n}} = \frac{1000Q_i}{60Q_i \gamma_i} \quad (1.4)$$

Звідси витрата повітря  $Q_i$  в першому наближенні визначається на підставі вибраної вагової концентрації суміші  $\mu_{\bar{n}}$  і годинної продуктивності установки  $Q_i$  за формулою:

$$Q_i = \frac{1000Q_i}{60\mu_{\bar{n}}\gamma_i} \quad (1.5)$$

де  $\gamma_i = 1,2 \text{ кг/м}^3$  – питома вага повітря.

Для визначення діаметра транспортного трубопроводу  $d_{\delta\delta}$  пропонується формула [46, 71]:

$$d_{\delta\delta} = \sqrt{\frac{4Q_n}{60\pi v_n}}, \quad (1.6)$$

або

$$d_{\delta\delta} = \sqrt{\frac{4V_n}{\pi v_n}}. \quad (1.7)$$

За цим діаметром визначають необхідну витрату повітря, [24, 46, 71, 92] за формулою:

$$V_i = \frac{Q}{3,6\gamma_i \mu_{\tilde{n}}} = \frac{\pi d^2}{4} v_i, \quad (1.8)$$

або

$$Q_i = \frac{60\pi d_{\delta\delta}^2 v_i}{4}. \quad (1.9)$$

Повний опір трубопроводу (загальні втрати тиску) [30, 71, 92] виражається сумою:

$$H_{i\hat{a}\hat{a}} = \dot{I}_{i\hat{a}} + \dot{I}_{i\hat{z}\hat{a}} + \dot{I}_{\hat{a}\hat{o}}, \quad (1.10)$$

де  $\dot{I}_{i\hat{a}}$  – попутні втрати тиску в трубопроводі з урахуванням втрат у відгалуженнях і перемикачах, Па;

$\dot{I}_{i\hat{z}\hat{a}}$  – втрати тиску на підйом матеріалу за наявності вертикальних ділянок, Па;

$H_{\hat{a}\hat{o}}$  – втрати тиску в завантажувальному пристрої на введення матеріалу в трубопровід, Па.

У розгорнутому вигляді повний опір визначається формулою:

$$H_{i\hat{a}\hat{a}} = \left[ K \mu_{\tilde{n}} \lambda \frac{\gamma_i v_i^2 L_m}{2g d_{\delta\delta}} + \gamma_i \mu_{\tilde{n}} h + (\chi + \mu) \frac{\gamma_{\hat{a}\hat{o}} v_{\hat{a}\hat{o}}^2}{2g} \right] \times 10^{-3}, \quad (1.11)$$

де  $K$  – експериментальний коефіцієнт опору;

$d_{\delta}$  – внутрішній діаметр трубопроводу, мм;

$v_i$  – швидкість повітря на виході з трубопроводу, м/сек;

$\lambda$  – коефіцієнт тертя чистого повітря по стінках труби [46].

$$\lambda = \beta / \mu_{\tilde{n}}, \quad (1.12)$$

де  $\beta$  – дослідний коефіцієнт, який залежить від величини

$$S = \mu_{\tilde{n}} L_i \delta v_i^2 / d_{\delta}, \quad (1.13)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$\gamma'_n$  – середня питома вага повітря на вертикальній ділянці, що приймається рівним 1,8 кг/м<sup>3</sup>, оскільки точний розподіл тиску по довжині трубопроводу невідомий;

$h$  – висота підйому матеріалу, м;

$\chi$  – коефіцієнт, що залежний від типу завантажувального пристрою;

$\gamma_{ex}$  і  $v_{ex}$  – питома вага і швидкість повітря на вході в трубопровід при початковому тиску  $P_0$  визначаються за формулами:

$$\gamma_{\hat{a}\hat{o}} = \gamma_i \frac{P_0}{P_i}; \quad (1.14)$$

$$v_{\hat{a}\hat{o}} = \frac{P_0}{P_i}. \quad (1.15)$$

Тиск, що створюється компресором  $p_m$  рекомендують визначати з виразу [46]:

$$P_i = P_{\delta} \alpha + P_i, \quad (1.16)$$

де  $P_{\delta}$  – робочий тиск в камері змішувача, Па.

$$P_{\delta} = H_i \hat{a} \hat{a} + 1, \quad (1.17)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт втрат в завантажувальному пристрої, що залежить від конструкції змішувача і приймається рівним 1,1...1,3 (менші значення – при

введенні повітря в камеру через тканинну перегородку, більші – при введенні повітря за допомогою струменевих сопел);

$\Delta P_i$  – втрати тиску в повітропроводі, що підводиться до робочого органу від компресорів 0,03...0,05 Па.

Повітропровід від компресора до завантажувального пристрою конструюють так, щоб він чинив якомога менше опору і не був громіздким, втрати тиску в ньому перевіряють за формулою:

$$P_{\dot{i}} = \lambda \frac{\gamma_{\dot{i}} v_{\dot{i}}^2 L_{\dot{i}} \delta}{2 g d_{\delta} \delta} 10^{-3} \leq 0,03 \div 0,05 \text{ Па.} \quad (1.18)$$

Величину загальних втрат тиску в мережі визначають з формули:

$$\sum P_{\dot{i}} = \left( \lambda \frac{L_{\dot{i}} \delta}{d_{\delta} \delta} + \sum \xi_{\dot{z}} \right) \frac{\gamma_{\dot{i}} v_{\dot{i}}^2}{2 g} (1 + K \mu_{\dot{n}}) + \gamma_{\dot{i}} \mu_{\dot{n}} \sum h + \Delta P_{\delta \hat{i} \zeta} + \sum \Delta P_{\dot{i} \hat{a}}, \quad (1.19)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт тертя повітря об стінки, що приймається рівним 0,02;

$L_{\dot{i}} \delta$  – приведена довжина трубопроводу, м;

$\sum \xi_{\dot{z}}$  – сума коефіцієнтів місцевих опорів, що приймаються для найбільш поширених вигинів трубопроводу;

$K$  – коефіцієнт опору, який для порошкоподібних матеріалів при швидкості повітря 16...22 м/с і концентрації суміші від 1 до 4 приймають  $K = 0,5 \dots 1,5$ ;

$\sum h$  – сума довжин всіх вертикальних ділянок, м;

$\sum \Delta P_{\dot{i} \hat{a}}$  – сума втрат тиску в повітродувних і очисних пристроях, Па;

$\Delta P_{\delta \hat{i} \zeta}$  – втрати тиску на розгін, що розраховується по формулі:

$$\Delta P_{\delta \hat{i} \zeta} = K_p \mu_{\dot{n}} \frac{\gamma_{\dot{i}} v_{\dot{i}}^2}{2 g}, \quad (1.20)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт опору на розгінній ділянці.

Перший доданок рівняння (1.19) характеризує втрати тиску на тертя в транспортуючому трубопроводі, другий – на підйом матеріалу.

А.О. Співаковський [92] рекомендує наступні залежності для визначення опору руху матеріалу та втрат тиску під час транспортування.

Опір руху аеросуміші в трубопроводі отримуємо з:

$$D_i = D_0 \left( 1 + \tilde{N}_c \mu \tilde{n} \frac{agD}{u^2} \right), \quad (1.21)$$

де  $P_0$  – втрати тиску при русі чистого повітря, Па.

Для ізотермічного процесу:

$$P_0 = \sqrt{\frac{Q_0^2 RT \lambda L_{np}}{F^2 g D \cdot 10^8} + P_k^2} - 1, \quad (1.22)$$

для ізохоричного процесу:

$$P_0 = \frac{\lambda u^2}{Dg} \gamma_0, \quad (1.23)$$

де  $Q_0$  – витрата повітря, кг/с;

$R=287$  – газова стала, Дж/кг·К;

$T$  – абсолютна температура навколишнього середовища, К;

$L_{i\delta}$  – приведена довжина трубопроводу, за даними [46, 71] в залежності

від схеми руху матеріалу виражається:

$$L_{i\delta} = \sum l_{\tilde{a}\hat{a}} + \sum l_{\hat{a}\hat{e}} + \sum l_{\hat{a}\hat{i}}, \quad (1.24)$$

де  $\sum l_{\tilde{a}\hat{a}}$  – сума геометричних довжин прямих горизонтальних, похилих і вертикальних ділянок, м;

$\sum l_{\hat{a}\hat{e}}$  – сума еквівалентних довжин прямокутних ділянок, м;

$\sum l_{\hat{a}\hat{i}}$  – сума еквівалентних довжин прямих ділянок для перемикачів, м;

$F$  – поперечний перетин трубопроводу, м<sup>2</sup>;

$P_{\hat{e}}$  – тиск в кінці трубопроводу, Па;

$C_c = 0,1 \dots 0,075$  – дослідна константа.

Значення динамічних втрат тиску для розгону матеріалу в трубопроводі за даними [92] обчислюється з виразу:

$$P_{\partial} = \frac{u^2}{2g} \gamma_0 (1 + \beta_{\mu}) \frac{1}{10^4}, \quad (1.25)$$

де  $\beta = 0,35 \dots 0,85$  – показник відносної швидкості руху частинок;

Втрати тиску на коротких ділянках вертикального трубопроводу:

$$P_h = (1 + \mu) \gamma_0 H_n \times 10^4. \quad (1.26)$$

Повний потрібний тиск в транспортній системі виражається величиною:

$$P = P_n + P_{\partial} + P_h + P_m, \quad (1.27)$$

де  $P_i$  – втрати тиску в завантажувальній пристрої, Па.

Якщо рух по трубопроводу пов'язаний з підйомом вантажу на висоту  $H = \sum l_{\hat{a}}$ , то до втрат на тертя необхідно додати величину ваги стовпа суміші повітря з вантажем, віднесеного до одиниці площі поперечного трубопроводу

$$P_n = \frac{H \gamma'_n \mu}{10^4}. \quad (1.28)$$

де  $\gamma'_i$  – питома вага повітря (середня для даної ділянки підйому), кг;

$\sum l_{\hat{a}}$  – сума довжин вертикальних ділянок трубопроводу, м.

Теоретичні і експериментальні дослідження руху стиснутого повітря в трубопроводі [46] забезпечують вирішення наступних рівнянь для визначення потрібного тиску повітря в трубопроводі:

для нагнітальних пристроїв:

$$P_i = P_{\hat{e}} \sqrt{1 + \frac{\lambda L_i \delta v_i^2}{d_{\partial} \delta}}, \quad (1.29)$$

для всмоктуючих пристроїв:

$$P_{\hat{e}} = P_i \sqrt{1 - \frac{\lambda L_i \delta v_i^2}{d_{\partial} \delta}}, \quad (1.30)$$

де  $D_i$  і  $D_{\hat{e}}$  – абсолютний тиск повітря відповідно в початковій і кінцевій точках транспортуючого трубопроводу приведеної довжини  $L_{i\delta}$ , Па;

$\lambda$  – коефіцієнт опору руху чистого повітря;

$d_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр трубопроводу, м.

В результаті вищевикладеного слід відмітити, що науковцями проведені глибокі дослідження роботи пневматичних забірних пристроїв, які дозволяють зрозуміти багато процесів, що в них проходять. Але всі вони, враховуючи значну кількість факторів, які визначають рух для ідеально сипких та сипких зв'язних матеріалів, містять рекомендації для вологих та пастоподібних матеріалів. Тому слід зауважити, закономірності для обґрунтування параметрів пневматичних забірних пристроїв які працюють з в'язким матеріалом розроблені недостатньо глибоко.

### **1.5. Висновки до розділу 1 і задачі дослідження**

1. Аналіз і узагальнення результатів наукових досліджень та практичного досвіду використання сапропелю свідчать про те, що він є екологічно чистою органо-мінеральною сировиною, яка вдосконалює та покращує структуру ґрунту, а також є якісним джерелом поповнення гумусу. Все це у сукупності забезпечує підвищення та підтримування родючості ґрунту.

2. Більшість відомих забірних пристроїв засобів для добування сапропелю не дозволяють виконувати добування сапропелів природної вологості за сприятливих техніко-економічних показників. Найбільш перспективним у цьому плані слід розглядати ерліфтні установки. Але для покращення умов забору покладів доцільно їх удосконалювати в напрямку інтенсифікації утворення повітряно-сапропелевої суміші, придатності до роботи за різних способів добування та на родовищах забруднених рослинними рештками.

3. Відсутність достовірних відомостей про фізико-реологічні властивості сапропелів, у природному стані, та для конкретних родовищ України, не дозволяють обґрунтувати параметри забірною пристрою засобу для добування сапропелю, що здатний забезпечити виконання висунутих вимог до якості добувних покладів.



4. Недостатньо глибоко розроблені закономірності для обґрунтування конструктивних параметрів пневматичних забірних пристроїв які працюють із в'язкими матеріалами.

Для досягнення вказаної мети необхідно 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 забірною 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.

## **РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПНЕВМАТИЧНОГО ЗАБІРНОГО ПРИСТРОЮ, ЗАСОБУ ДЛЯ ДОБУВАННЯ САПРОПЕЛЮ**

### **2.1 Загальна методика досліджень**

Виконання дисертаційної роботи відбувалось шляхом проведення теоретичних та експериментальних досліджень, а також лабораторно-виробничих випробувань, які виконувались поетапно. Так, експериментальні дослідження згідно плану роботи, виконувались в сумісництві з теоретичними.

Технічне рішення, щодо напрямку досліджень, отримали як результат аналізу відомих технологій та процесів які застосовуються при розробці покладів озерних сапропелів. Де звертали увагу на енергозатрати та якість добутої сировини. Як підсумок була запропонована нова технологія та спосіб розробки, а також конструкції забірних пристроїв, доцільність використання яких обґрунтували теоретичними та експериментальними дослідженнями.

Теоретичні дослідження виконувались після глибокого аналізу відомих наукових праць, у технічній літературі, за напрямком гідродинамічні процеси багатофазного середовища, та проведених лабораторних випробувань лабораторної установки засобу для добування сапропелів із пневматичним забірним пристроєм. Підсумком таких досліджень стало обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів забірного пристрою, на основі яких сконструйовано та виготовлено його дослідний зразок а також проведені випробування у виробничих умовах. Випробування забірного пристрою, що входить до складу засобу для добування сапропелю підтвердили його роботоздатність, дали очікуваний позитивний результат та низку переваг у порівнянні з іншими відомими розробками. Загальну схему планування та проведення досліджень для вирішення поставлених у роботі завдань наведено на рис. 2.1. Завдання досліджень передбачало визначення мети та вибору методів досліджень об'єктів, що висувались.

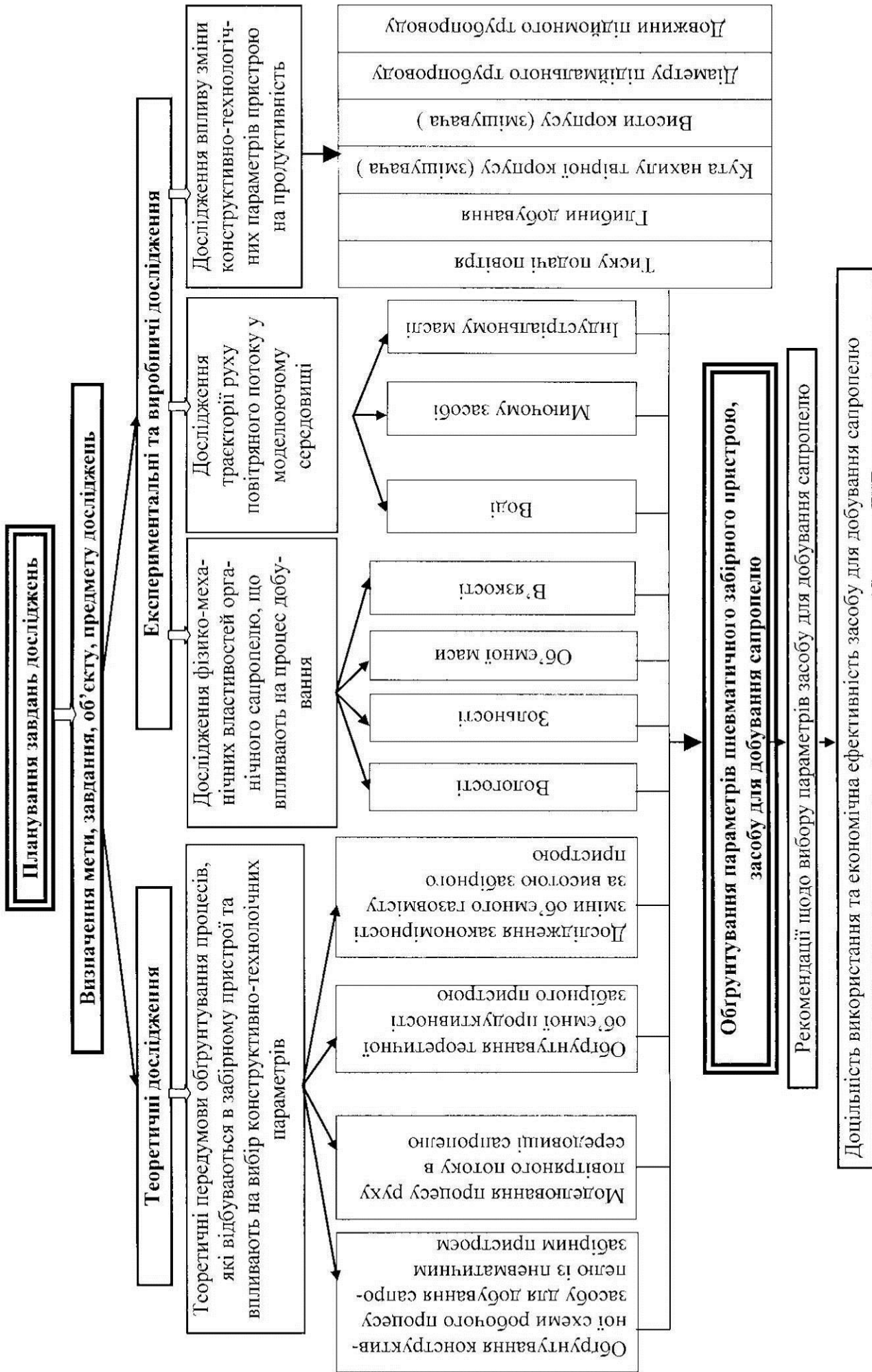


Рис 2.1. Схеми планування реалізації досліджень

## **2.2. Обґрунтування конструктивної схеми забірної пристрою засобу для добування сапропелю**

Найбільш перспективним з точки зору мінімізації та енергетичних затрат на отримання сапропелевої сировини для добрив є пневматичні добувні засоби, що працюють з підводними та підземними розробками родовищ корисних копалин. Тому, запропонована нова конструкція пневматичного забірної пристрою, що входить до складу засобу для добування сапропелю, призначеного для забезпечення сільського господарства якісною органічною сировиною для формування добрив являється альтернативною розробкою. Основні аспекти роботи даного засобу базуються на використанні енергії стисненого повітряного потоку.

Запропонована конструкція забірної пристрою дозволяє добувати поклад природної вологості, чим заощаджує на власних енерговитратах витратах та на зневоднення, а також забезпечує інтенсифікацію процесу. Суть роботи даного засобу заснована на формуванні двокомпонентного середовища шляхом рівномірного самозаповнення забірної частини (змішувача) пристрою сапропелевою масою та примусової подачі стиснутого повітря. Весь процес добування покладів сапропелів з підводних родовищ відбувається на основі утворення висхідного двофазного потоку: повітря – сапропель. Розрихлення та забір покладів відбувається енергією потоків стиснутого повітря, що утворюють пневмозріджену суміш, а підйом, у такому ж стані, до надводної поверхні відбувається за рахунок виштовхувальної сили Архімеда та кінетичної енергії того ж самого повітря. На рисунку 2.2, зображена схема запропонованого пневматичного забірної пристрою [60] засобу для добування сапропелю. Даний забірний пристрій складається з забірної частини (змішувача) в зборі, призначеної для розрихлення та забору середніх і нижніх шарів сапропелю; піднімального трубопроводу 8 – для транспортування даних покладів до надводної поверхні та розподільчого вивідного рукава 10 – для спрямування покладів до баржі та

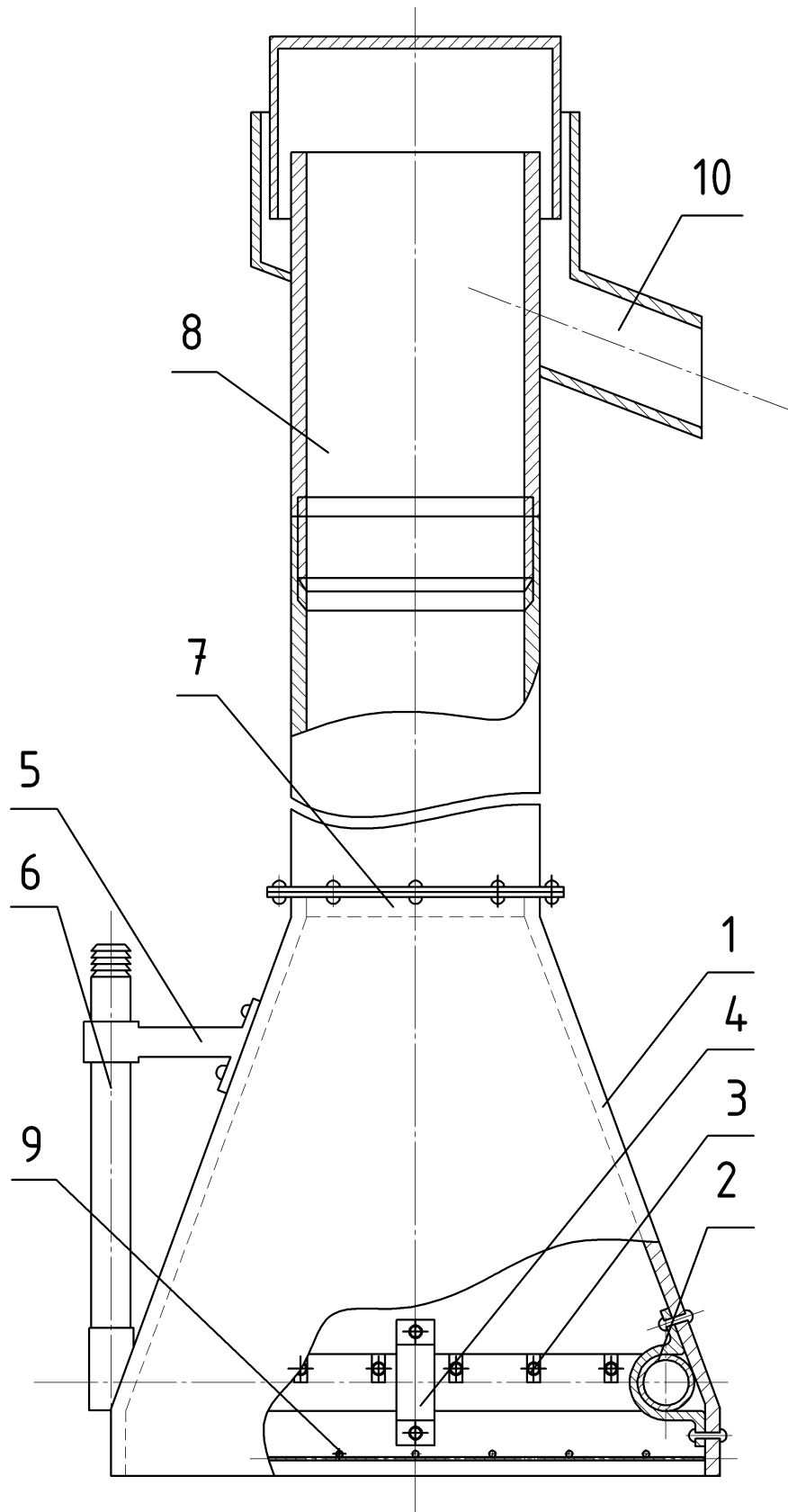


Рис. 2.2. Схема пневматичного забірної пристрою: 1 – корпус; 2 – напірний повітропровід з соплами 3; 4, 5 – кронштейни; 6 – магістраль подачі повітря; 7 – вихідне вікно; 8 – піднімальний трубопровід; 9 – захисна решітка; 10 – розподільчий вивідний рукав

відділення їх від повітря. Забірна частина (змішувач) в зборі містить конічний корпус 1, до якого біля краю ширшої внутрішньої сторони прикріплений кільцевий напірний повітропровід 2. В кільцевий напірний повітропровід шарнірно вмонтовані, з можливістю повертання і фіксації в будь-якому напрямку відносно базової осі пристрою сопла 3, для виходу стиснутого повітря. Також забірна частина оснащена вихідним вікном 7, захисною решіткою 9 та кронштейнами 4, 5, відповідно якими кріпиться кільцевий напірний повітропровід та магістраль подачі повітря 6.

Відповідно до складу засобу для добування сапропелю (рис. 5.1) слід віднести: забірний пристрій (рис.2.2), плавзасіб з баржею, джерело енергії (генератор), повітродувна машина (компресор), маніпулятор для переміщення та глибиномір.

Засіб для добування сапропелю працює наступним чином. Під час вертикального занурювання маніпулятором забірного пристрою в підводні родовища, верхній (пелоген), а потім і середній шар сапропелю заповнює порожнину корпусу. Стиснуте повітря, що подається від компресора через гумовий шланг до магістралі подачі повітря потрапляє до кільцевого напірного повітропроводу і виходить через сопла, де формує двофазне середовище. За рахунок взаємодії струменів повітряного потоку і сапропелю, що знаходиться всередині корпусу, поклади сапропелю розбиваються на окремі шматки. Пневморозріджений потік сапропелю і повітря надходить до середини корпусу та направляється до вихідного вікна з якого потрапляє до піднімального трубопроводу, а перетинаючи горизонтальне його січення розподіляється по окремим фазам. Повітря потрапивши до піднімального трубопроводу заповнює його переріз та рухається у вигляді снаряду до надводної поверхні, штовхаючи перед собою певний об'єм сапропелю (пробку), що заповнив трубопровід під час занурення, та підтягуючи за собою наступну пробку сапропелю яка штовхається іншим снарядом повітрям, що формує вихідне вікно, і так періодично після наступного заповнення – наступне штовхання. Після чого сапропель через вивідний рукав потрапляє до баржі, а повітря виходить в

атмосферу. Захисна решітка призначена для унеможливлення забивання корпусу пристрою сторонніми предметами різного походження. Для подовження підйимального трубопроводу передбачено відрізки труб, що монтуються за допомогою муфт, оскільки глибина добування поступово збільшується.

Добування сапропелів з підводних родовищ відбувається папільонажно-воронковим або траншейним методом розробки з під шару пелогену. Подальші переміщення забірною пристрою відбуваються в середовищі покладів, з метою унеможливлення збовтування води у водоймі та забивання захисної решітки рослинністю.

На основі запропонованої пневматичної технології створені енергоощадні перспективні конструкції забірних пристроїв, які здатні добувати сапропелі природної вологості, мають високу продуктивність, малу операційність, прості елементи конструкції та не мають механічних елементів приводу [60, 65, 66].

### **2.3. Дослідження робочого процесу забірною пристрою**

Дослідження принципу роботи та конструкцій машин аналогів дозволили виявити значну подібність між процесами, які відбуваються у запропонованому забірному пристрої та ерліфтних установках. Суттєва відмінність між ними полягає у формі корпусу або змішувача як його прийнято називати у засобах для добування сапропелю.

Лабораторні дослідження процесу роботи засобу для добування сапропелю показали, що явища, які мають місце під час взаємодії повітря з сапропелем у змішувачі та піднімальному трубопроводі, відповідають відповідно бульбашковій та снарядній структурі руху висхідного двокомпонентного (двофазного) середовища. Чіткий перехід бульбашкового режиму руху у снарядний відбувається за рахунок переходу конусного корпусу (змішувача) у циліндричний піднімальний трубопровід. Тому при аналізі робочого процесу забірною пристрою засобу для добування сапропелю

зупинимось саме на процесі його роботи із вищевказаними структурами руху висхідної течії.

Проведені Кононенко А.П. теоретичні та експериментальні дослідження затрат потужності на роботу ерліфтів за різних структур водоповітряної суміші вказують на те, що за даним показником найбільш доцільним є використання снарядної структури суміші [32].

Схема роботи забірною пристрою для добування сапропелю, відповідно до рис. 2.2, під час його роботи із бульбашковою та снарядною структурою повітряно-сапропелевої суміші наведена на (рис. 2.3). Аналізуючи дану схему, з точки зору формування двокомпонентної суміші, можна описати наступні процеси.

Після виходу струменя повітря через сопла 2, кільцевого напірного повітропроводу 3, у корпус 4, під деяким кутом до поперечного січення пристрою відбувається передача кінетичної енергії від повітря до частинок сапропелю. Кут виходу струменя повітря у початковий момент рівний куту нахилу осі сопла  $\alpha_0$ . Далі кут нахилу струменя зростає, швидкість струменя падає, він розпадається на окремі бульбашки та зростає ширина потоку. Тобто відбувається насичення покладів бульбашками повітря, що призводить до формування бульбашкової структури середовища. Співвідношення у суміші між повітрям та сапропелем прийнято оцінювати об'ємним газовмістом:

$$\varphi_i = V_i / V, \quad (2.1)$$

де  $V_i$  – об'єм повітря у суміші об'ємом  $V$ , м<sup>3</sup>.

Даний процес також супроводжується поступовим об'єднанням бульбашок. Володіючи різною швидкістю, дрібніші та крупніші бульбашки постійно наздоганяють один одного, стикаються і зливаються, внаслідок чого спостерігається зростання останніх. В результаті, розмір бульбашок збільшується настільки, що поперечний перетин однієї або декількох бульбашок наближається до поперечного перетину каналу вивідного вікна (кінцева частина конічного корпусу, початок піднімального трубопроводу 5).



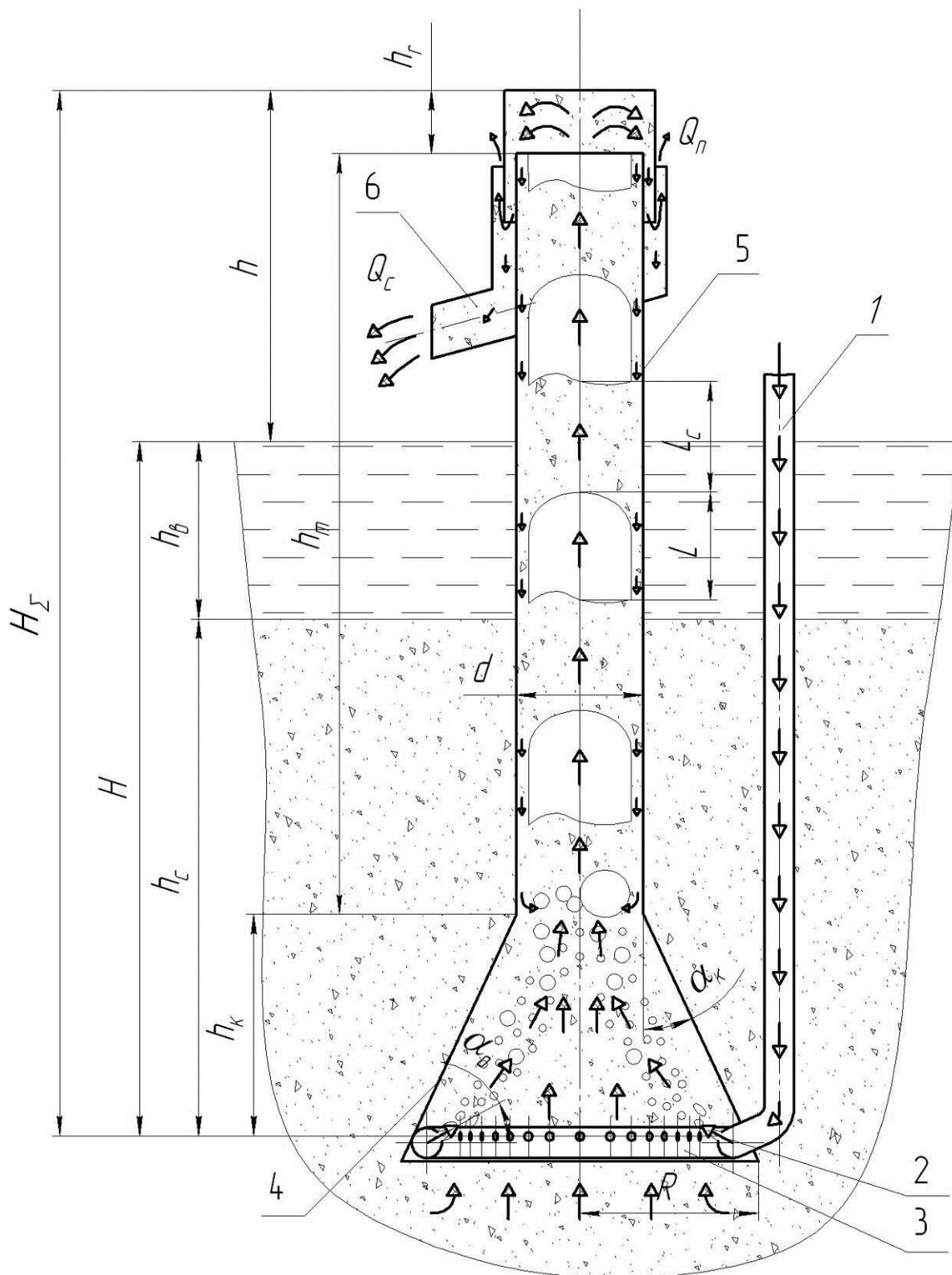


Рис. 2.3. Схема робочого процесу пневматичного забірної пристрою із бульбашковою та снарядною структурами повітряно-сапропелевого потоку: 1 – магістраль подачі повітря; 3 – кільцевий напірний повітропровід з соплами 2; 4 – корпус; 5 – піднімальний трубопровід; 6 – розподільний вивідний рукав

Таким чином, встановлення саме конічного корпусу забезпечує перехід бульбашкового режиму руху двофазного середовища в снарядний незалежно від початкового розміру бульбашок.

За розглядуваного режиму руху повітряно-сапропелевої суміші у циліндричних піднімальних трубопроводах виділяють центральний стовп суміші, який здійснює висхідний рух, та периферійну зону із низхідним потоком. Під час такого процесу має місце підймання повітря через центральну частину підйимального трубопроводу у вигляді снаряду та захоплення ним сапропелю, а біля стінок трубопроводу – низхідний потік сапропелю, який частково гальмує вертикальне переміщення снарядів повітря.

Аналізуючи розглядуваний режим руху в конічному корпусі забірнопристрою (рис. 2.3) можна виділити певні відмінності від процесів у корпусі циліндричної форми, які застосовуються у ерліфтах. Тут матиме місце більш раціональний розподіл бульбашок повітря, за перерізом корпусу. Це пояснюється узгодженням кута відхилення струменя  $\alpha(h)$ , а у подальшому і потоку бульбашок, та кутом нахилу твірної корпусу  $\alpha_k$ . Тобто у такому випадку підймання повітря буде здійснюватись спочатку кільцем певної товщини (враховуючи розміщення та кількість сопел для виходу стиснутого повітря), яке примикає до стінок конічного корпусу із подальшим зменшенням діаметра центрального отвору, аж до нульового значення. Тому периферійна зона із низхідним потоком буде мінімальною, або ж взагалі відсутньою.

Стосовно центральної зони можна виділити два наступні випадки. У першому випадку, коли здійснюється підймання повітряно-сапропелевої суміші циліндричним піднімальним трубопроводом, а отже і її забір із перехідної зони між конічною та циліндричною частинами, то і у центральній зоні матиме місце висхідний потік. У другому випадку, коли підймання суміші трубопроводом не здійснюється (період пуску пристрою), то у центральній частині зони матиме місце низхідний потік повітряно-сапропелевої суміші. Коли тривалість такого процесу прямує до нуля, то у конічній частині відбувається лише перемішування суміші та додаткове її насичення повітрям

(зростає газівміст), що сприяє пуску засобу. За більшої тривалості процесу і досягненні газівмісту значення близького до  $\varphi_n=1$  відбуватиметься вихід повітря за зовнішні межі конічного корпусу та його барботаж крізь шар сапропелю та води на поверхню водойми, що є недоцільним.

Відповідно до вище наведеного, виконання корпусу забірною пристрою у вигляді конічної труби сприяє підвищенню продуктивності засобу для добування сапропелю загалом, що підтверджено експериментальними дослідженнями (п. 5.2). Але тут слід прагнути до максимального узгодження між кутом відхилення струменя  $\alpha(h)$  (потоків бульбашок) від поперечного перерізу конічного корпусу та кутом нахилу його твірної  $\alpha_k$ .

У той же час, бульбашковий режим руху газоповітряної суміші характеризується більшістю дослідників [31, 38], як перехідний і він може виникати за об'ємного газівмісту  $\varphi_n < 0,2 \dots 0,3$ . Такі висновки повністю узгоджуються із наведеною схемою (рис. 2.3), оскільки зменшення площі поперечного перерізу конічного корпусу змішувача із його висотою призводитиме до зростання газівмісту і за  $\varphi_n > 0,2 \dots 0,3$  бульбашковий режим руху буде переходити у снарядний. Розташування зони зміни режиму руху буде залежати від початкового значення об'ємного газівмісту та геометричних параметрів конічного корпусу змішувача. Доцільність існування бульбашкового режиму руху сапропелюгазоповітряної суміші у конічному корпусі обґрунтовується необхідністю подрібнення волокнистої структури покладів сапропелю з метою зниження опору на піднімання. Особливо це стосується сапропелю органічного типу із пониженою вологістю.

Залежність, яка пов'язує сумарна геометрична довжина пневматичного забірною пристрою (рис. 2.3) із характеристиками родовища сапропелю має вигляд:

$$h + \dot{I} = h_e + h_o + h_r = h + h_a + h_{\bar{n}} = H_{\Sigma}, \quad (2.2)$$

де  $h$  – геометрична висота розташування пристрою над поверхнею води, м;

$\dot{I}$  – глибина добування сапропелю, м;

$h_k$  – висота корпусу м;

$h_{\delta}$  – довжина піднімального трубопроводу радіусом  $r$ , м;

$h_a$  – товщина водного дзеркала водойми, м;

$h_n$  – товщина шару сапропелю з під якого ведеться добування, м;

$h_r$  – висота розташування вивідного розподільчого рукава над піднімальним трубопроводом, м;

$H_{\Sigma}$  – габаритний розмір пристрою, м.

За снарядної структури повітряно-сапропелевої суміші, яка може існувати коли об'ємний газівміст знаходиться в межах  $0,2 \dots 0,3 < \varphi_n < 0,6 \dots 0,8$  [50], потік рухається з приведеною швидкістю  $v_{\bar{n}}(h)$ . Але структура потоку не є гомогенною, а складається із великих бульбашок (снарядів) довжиною  $L$ , які рухаються з швидкістю  $v''(h)$  і сапропелевих пробок довжиною  $L_c$ , що рухаються з швидкістю  $v'(h)$  та містять газову фазу у вигляді дрібних бульбашок. Снаряди повітря та пробки сапропелю рухаються по чергово. У пристінній плівці відбувається зворотній рух сапропелю із швидкістю  $v'_n(h)$ .

Існування того чи іншого виду структури газорідинної суміші оцінюється відносним зануренням змішувача [14, 31], яке стосовно розглядуваного пристрою становить:

$$\alpha_{\zeta} = \frac{\dot{I}}{\dot{I} + h} = \frac{h_a + h_n}{h_e + h_{\delta} + h_r}, \quad (2.3)$$

Даний показник для існування бульбашкового та снарядного режимів руху газорідинної суміші повинен знаходитись у межах  $0,4 < \alpha_{\zeta} < 1,0$ , тобто за даним показником не можна визначити межу у існуванні наведених режимів руху.

Визначати початок процесу зміни снарядної газорідинної структури суміші на емульсійну дозволяють критерії Фруда [14], Кутателадзе [38] і ін. Даний процес носить кризовий характер та отримав назву «захлинання».

У той же час, у відомих дослідженнях не описуються достовірні кількісні оцінки переходу бульбашкового режиму в снарядний. Складність отримання таких залежностей полягає у відсутності кризового характеру зміни структури

двофазного бульбашкового потоку та появи снарядного режиму, яка відбувається лише в результаті злиття більш дрібних бульбашок у великі снаряди. Тому для оцінки переходу від бульбашкового режиму руху у змішувачі до снарядного будемо використовувати об'ємний газовміст, та вважатимемо межею значення  $\varphi_n=0,2\dots0,3$ .

#### 2.4. Моделювання процесу руху повітряного потоку в середовищі сапропелю

Важливим елементом під час дослідження динамічних процесів, що відбуваються у змішувачі забірного пристрою, являється дослідження руху потоку стиснутого повітря в середовищі сапропелю.

У відповідності до (рис. 2.3) процес виходу стиснутого повітря через сопла кільцевого напірного трубопроводу супроводжується формуванням повітряного потоку (струменю) високого тиску, який взаємодіє із масою сапропелю, розрихлює поклади та подрібнюється на окремі одиничні бульбашки різного об'єму. Даний потік, піднімаючись у висхідному напрямку, розширюється, утворюючи сапропелеповітряну суміш тим самим піднімає сапропелеву масу до вихідного вікна змішувача.

Вважаючи, що повітряний потік складається із окремих бульбашок кулястої форми, розглянемо рух довільної бульбашки масою  $m$  яка рухається у сапропелевому середовищі з глибини  $H$ . Початкова швидкість бульбашки задана її проекціями  $v_{ox}$  та  $v_{oy}$  на осі  $OX$  і  $OY$  двомірної декартової системи координат  $XOY$  (рис. 2.4).

З врахуванням вище наведеного на бульбашку діють наступні сили:

- сила ваги  $mg$  ;
- виштовхувальна сила Архімеда  $F_{\text{А\text{д\text{о}}}}$  ;
- сила лобового опору (сила Стокса)  $F_{\text{Н\text{д\text{і}}\text{е}}}$  .

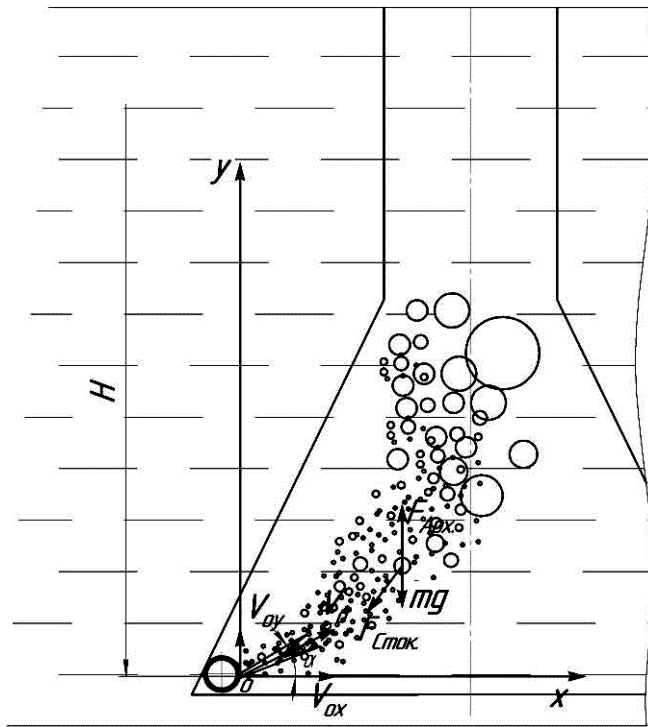


Рис. 2.4. Розрахункова схема руху бульбашок повітря у середовищі сапропелю

Відповідно до формули Бернуллі тиск повітря в бульбашці становить:

$$P = P_{\text{атм}} + \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.4)$$

де  $P_{\text{атм}}$  – атмосферний тиск, Па;

$\rho$  – густина сапропелю,  $\text{кг/м}^3$ ;

$y$  – біжуче значення координати центра мас бульбашки вздовж осі  $OY$ , м;

$v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 = v_{ox}^2 + v_{oy}^2$  – квадрат швидкості руху бульбашки,  $\text{м/с}^2$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ .

Відповідно до формули Менделєєва-Клапейрона об'єм бульбашки становить:

$$V = \frac{m}{\mu \cdot P} \cdot R \cdot T \quad (2.5)$$

де  $m$  – маса повітря у бульбашці, кг;

$\mu$  – молярна маса повітря,  $\mu=0,029$   $\text{кг/моль}$ ;

$R$  – універсальна газова стала,  $R=8,31$   $\text{Дж/моль}\cdot\text{К}$ ;

$T$  – абсолютна температура бульбашки, К.

Підставивши (2.4) в (2.5) отримаємо:

$$V = \frac{2 \cdot m \cdot R \cdot T}{\mu \cdot \left( 2 \cdot P_{\dot{\alpha}\dot{\delta}i} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \right)}. \quad (2.6)$$

Виштовхувальна сила Архімеда дорівнює:

$$F_{\dot{\alpha}\dot{\delta}\delta} = \rho \cdot g \cdot V. \quad (2.7)$$

З урахуванням (2.6) формула (2.7) набуде вигляду:

$$F_{\dot{\alpha}\dot{\delta}\delta} = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \rho \cdot R \cdot T}{\mu \cdot \left( 2 \cdot P_{\dot{\alpha}\dot{\delta}i} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \right)}. \quad (2.8)$$

Для обчислення сили лобового опору Стокса, що діє на бульбашку, наближено вважатимемо останню бульбашку радіусом  $r_a$ . Тоді можна записати:

$$F_{\dot{N}\dot{\delta}i\hat{e}} = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_a \cdot v, \quad (2.9)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості сапропелю, Па·с;

$v$  – швидкість руху бульбашки, м/с.

Коефіцієнт в'язкості для ньютонівських рідин не залежить від швидкості деформації зсуву середовища, що у розглядуваному випадку відповідає швидкості руху бульбашки  $v$ , а для більшості реальних рідин швидкість зсуву суттєво впливає на коефіцієнт в'язкості. Тому коефіцієнт в'язкості у формулі (2.9) слід вважати функцією від швидкості бульбашки  $\eta(v)$ . Наприклад, для сапропелю у результаті експериментальних досліджень (п. 4.4) встановлено, що така функція має вигляд степеневі залежності.

$$\eta = q \cdot v^{-b}, \quad (2.10)$$

де  $q$  та  $b$  – коефіцієнти значення яких залежить від вологості сапропелю.

Проте, залежність (2.10) можна використовувати і для ньютонівських рідин (наприклад води) вважаючи, що  $q = \eta = const$ , а  $b = 0$ . Тому зважаючи на викладене із (2.9) з урахуванням (2.10) отримаємо:

$$F_{\dot{N}\dot{\delta}i\hat{e}} = -6 \cdot \pi \cdot q \cdot v^{1-b} \cdot r_a. \quad (2.11)$$

Радіус  $r_{\dot{a}}$  повітряної кульки з урахуванням (2.6) дорівнює:

$$r_{\dot{a}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m \cdot R \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot \mu \left( 2 \cdot P_{\dot{a}\dot{a}i} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \right)}} \quad (2.12)$$

У такому випадку сила лобового опору Стокса дорівнює:

$$F_{\vec{N}\dot{a}\dot{a}i\dot{e}} = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot q \cdot v^{1-b} \times \\ \times \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m \cdot R \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot \mu \left( 2 \cdot P_{\dot{a}\dot{a}i} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \right)}}. \quad (2.13)$$

Відповідно до II закону Ньютона запишемо:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_{\dot{A}\dot{\delta}\dot{o}} + \vec{F}_{\vec{N}\dot{a}\dot{a}i\dot{e}} \quad (2.14)$$

З урахуванням (2.8) та (2.13) формула (2.14) у проекціях на осі координат набуде вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{x} = -6 \cdot \pi \cdot q \cdot \dot{x}^{1-b} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m \cdot R \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot \mu \left( 2 \cdot P_{\dot{a}\dot{a}i} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \right)}}; \\ m\ddot{y} = -m \cdot g + \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \rho \cdot R \cdot T}{\mu \left( 2 \cdot P_{\dot{a}\dot{a}i} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \right)} - \\ - 6 \cdot \pi \cdot q \cdot \dot{x}^{1-b} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m \cdot R \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot \mu \left( 2 \cdot P_{\dot{a}\dot{a}i} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \right)}}. \end{array} \right. \quad (2.15)$$

Виразимо із (2.5) масу бульбашки через її об'єм  $V_0$  при абсолютному тиску  $P_{\dot{a}\dot{a}i}$

$$m = \frac{\mu P_{\dot{a}\dot{a}i} V_0}{RT} \quad (2.16)$$

Розділивши праву та ліву частину рівнянь системи (2.15) на  $m$  з урахуванням (2.16) та після перетворень отримаємо:



$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = -6 \cdot \pi \cdot \frac{R \cdot T}{\mu} \cdot q \cdot \dot{x}^{1-b} \times \\ \times \sqrt[3]{\frac{3}{2 \cdot \pi \cdot P_{\dot{\alpha} \dot{\alpha} i} \cdot V_0 (2 \cdot P_{\dot{\alpha} \dot{\alpha} i} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2))}}; \\ \ddot{y} = -g + \frac{2 \cdot g \cdot \rho \cdot R \cdot T}{\mu \cdot (2 \cdot P_{\dot{\alpha} \dot{\alpha} i} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2))} - \\ - 6 \cdot \pi \cdot \frac{R \cdot T}{\mu} \cdot q \cdot \dot{y}^{1-b} \times \\ \times \sqrt[3]{\frac{3}{2 \cdot \pi \cdot P_{\dot{\alpha} \dot{\alpha} i} \cdot V_0 (2 \cdot P_{\dot{\alpha} \dot{\alpha} i} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2))}}. \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Розв'язок даної системи неоднорідних диференціальних рівнянь другого порядку здійснювали числовим методом Розенброка у середовищі Maple (Додаток А). Для цього були визначені наступні початкові умови:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0 = 0; \\ \phi_0 = 0; \\ \dot{x}_0 = v_{ox}; \\ \dot{\phi}_0 = v_{0\phi}. \end{array} \right. \quad (2.18)$$

За початкову швидкість повітряної бульбашки  $v_0$  вважатимемо швидкість у найменшому перерізі струменю повітря під час його виходу крізь сопла напірного трубопроводу. Дану швидкість для адіабатного процесу можна розрахувати за формулою [120].

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_i}{(k-1) \cdot \rho_{i\dot{\alpha} \dot{\alpha}}} \left[ 1 - \left( \frac{P_{\bar{n}}}{P_i} \right)^{\left( \frac{k-1}{k} \right)} \right]}, \quad (2.19)$$

де  $k$  – показник адіабати,  $k=1,4$ ;

$P_i$  – тиск повітря у напірному повітропроводі, Па;

$\rho_{i\dot{\alpha} \dot{\alpha}}$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$P_{\bar{n}}$  – тиск у середовищі в яке виходить повітряний потік, Па.

У розглядуваному випадку повітряний потік виходить у середовище сапропелю, що знаходиться на глибині  $H$  та перебуває під тиском

$$P_{\bar{n}} = P_{a\delta i} + \rho \cdot g \cdot H. \quad (2.20)$$

Тому формула (2.19) набуде вигляду:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_i}{(k-1) \cdot \rho_{i\hat{a}}} \left[ 1 - \left( \frac{P_{a\delta i} + \rho \cdot g \cdot H}{P_i} \right)^{\left( \frac{k-1}{k} \right)} \right]}. \quad (2.21)$$

Проте, швидкість газу зростає зі зростанням різниці тисків  $P_{\bar{n}}$  і  $P_i$  лише до тих пір поки дана швидкість не досягне межі швидкості звуку для даного середовища. Для повітря така різниця тисків визначається відношенням

$$\beta_{e\delta} = P_{\bar{n}}/P_i = 0,528, \quad (2.22)$$

а досліджуваний процес відбувається за тиску  $P_i = 200 \dots 500$  кПа та за  $P_{\bar{n}} = 120 \dots 160$  кПа. Тому швидкість у найменшому перерізі струменю слід розраховувати за формулою:

$$v_0 = v_{e\delta} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot R \cdot T_i}, \quad (2.23)$$

де  $T_i$  – температура за якої знаходиться стиснуте повітря, що нагнітається, К.

Проекції початкової швидкості  $v_0$  на осі координат визначатимуться залежностями

$$v_{ox} = v_e \cos \alpha; \quad (2.24)$$

$$v_{oy} = v_e \sin \alpha, \quad (2.25)$$

де  $\alpha$  – кут відхилення осі вихідного сопла напірного трубопроводу від горизонталі, град.

Для перевірки адекватності теоретичних залежностей в середовищі Maple в двомірній системі координат побудовано графічні залежності траєкторії руху бульбашки повітря у воді (рис. 2.5, 2.6), в індустріальному

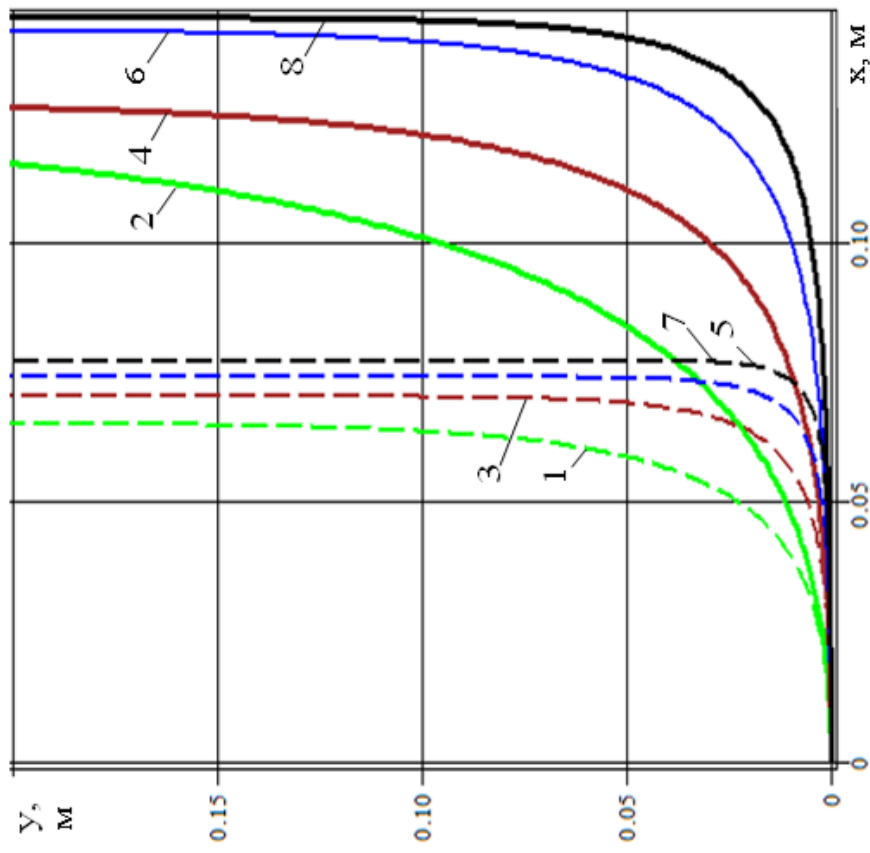


Рис. 2.5. Форма меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із горизонтального сопла діаметром 1,0 мм за тиску подачі:  
 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа;  
 7-8 – 500 кПа

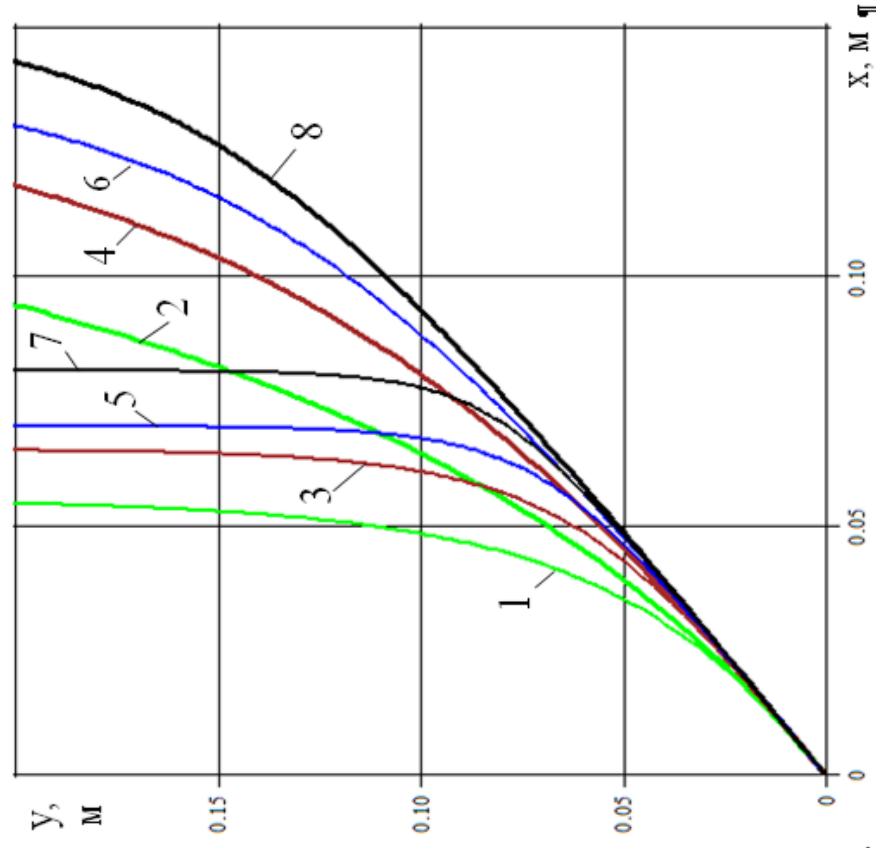


Рис. 2.6. Форма меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із сопла діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на 45° за тиску подачі:  
 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа;  
 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

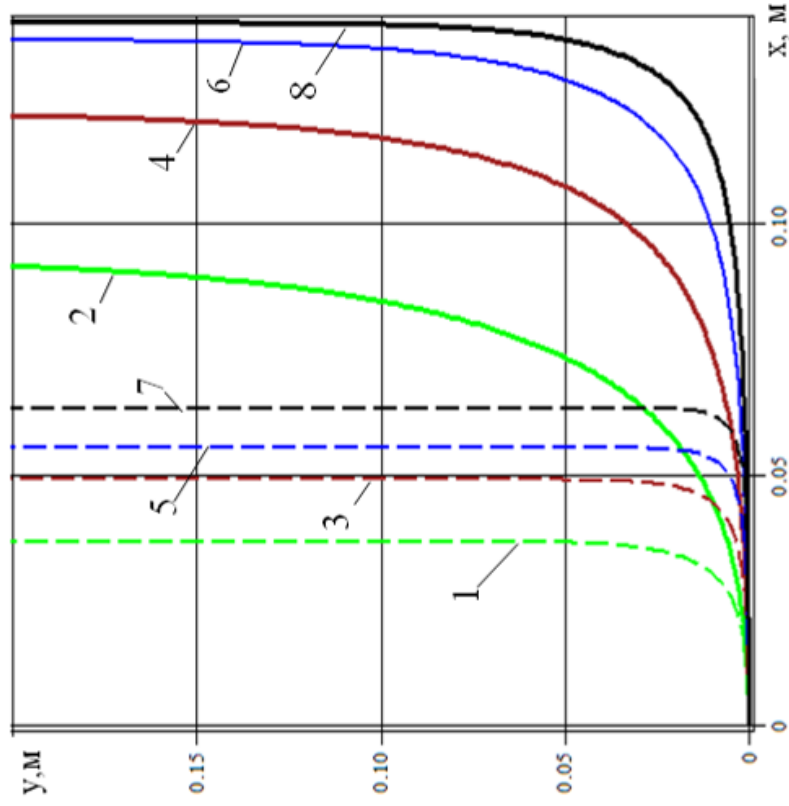


Рис. 2.7. Форма меж повітряного потоку під час його руху у маслі індустріальному після виходу із горизонтального сопла діаметром 1,0 мм за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

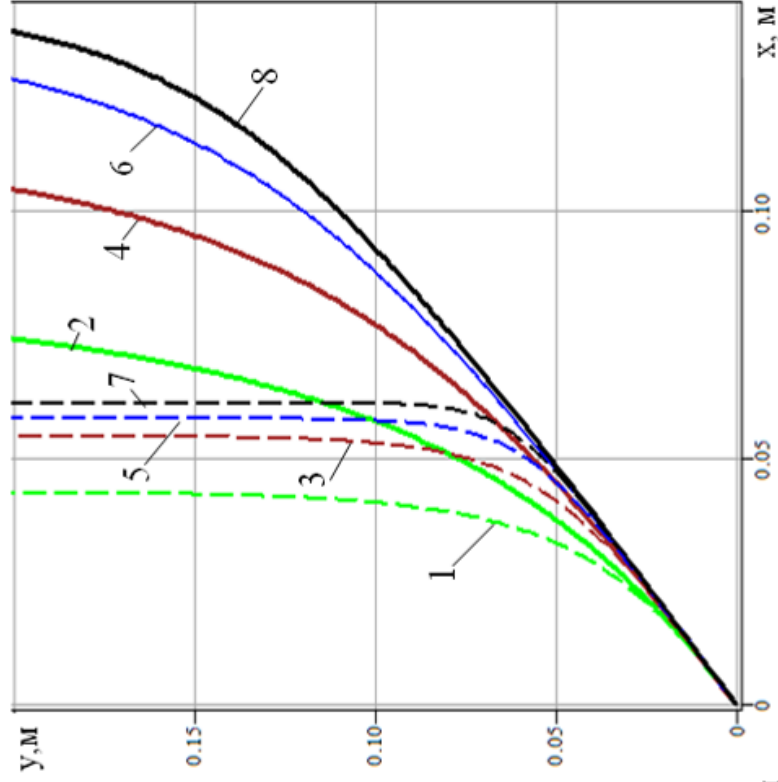


Рис. 2.8. Форма меж повітряного потоку під час його руху у маслі індустріальному після виходу із сопла діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

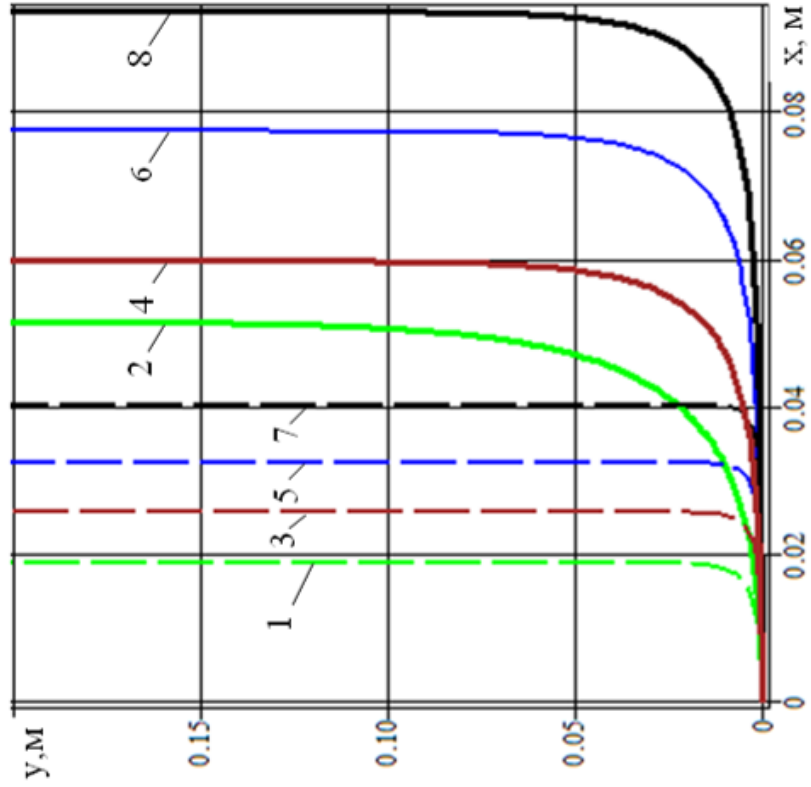


Рис. 2.9. Форма меж повітряного потоку під час його руху у миючому засобі після виходу із горизонтального сопла діаметром 1,0 мм за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

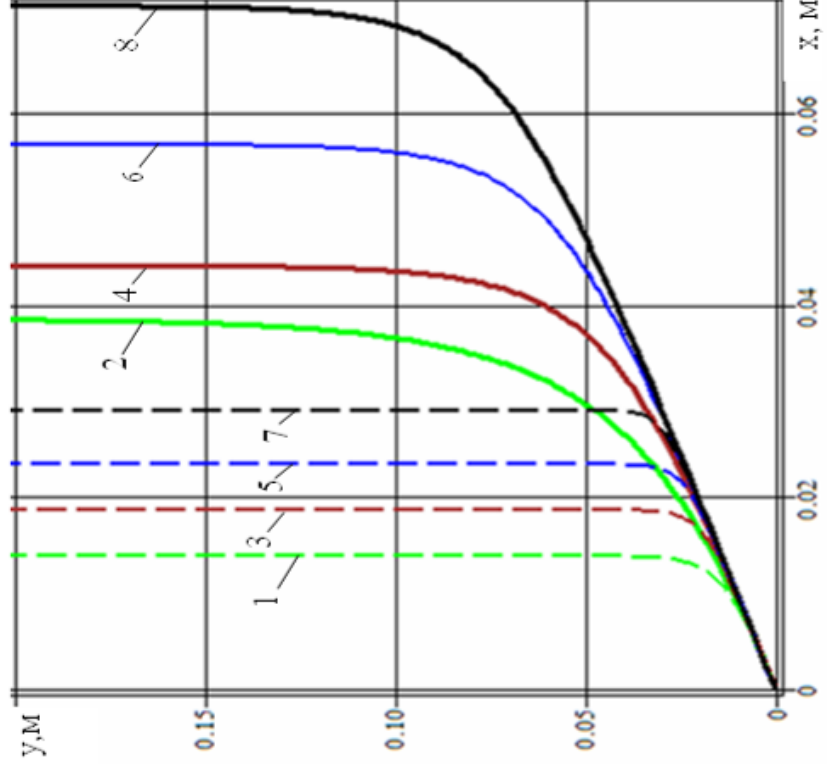


Рис. 2.10. Форма меж повітряного потоку під час його руху у миючому засобі після виходу із сопла діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа ; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

маслі SAE 40 (рис. 2.7, 2.8) та у концентрованому миючому засобі (ТУ У 24.5 23731918-010-2003) (рис. 2.9, 2.10). Траєкторії будувались попарно для максимального та мінімального діаметрів бульбашок повітря, що забезпечувало формування контуру повітряного потоку (аналогічно до експериментальних досліджень у п. 4.5).

Порівняння побудованих за математичною моделлю (2.17) та отриманих у результаті експериментальних досліджень графічних залежностей що обмежують форму повітряного потоку у воді, маслі індустріальному та концентрованому миючому засобі вказують на достатню адекватність моделі. Оскільки відхилення між розрахунковими та експериментальними значеннями координат в діапазоні віддалей від вихідного сопла 0,05...0,20 м не перевищує 10 – 12 %. Хоча відхилення між цими значеннями у діапазоні віддалей від вихідного сопла 0...0,05 м є вищими і досягають 20...25 %. Оскільки адекватність математичної моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь (2.17) підтверджується то дана модель використана для побудови форми повітряного потоку у сапропелі вологості  $W = 95 \pm 1$  % (рис. 2.11, 2.12),  $W = 90 \pm 1$  % (рис. 2.13, 2.14),  $W = 85 \pm 1$  % (рис. 2.15, 2.16) за сталої глибини занурення забірною пристрою  $H = 4$  м.

Також для аналізу впливу глибини занурення забірною пристрою на форму повітряного потоку побудовані аналогічні графічні залежності для сапропелю вологістю  $W = 95 \pm 1$  % за  $H = 2$  м (рис. 2.17) та сапропелю із  $W = 90 \pm 1$  % за  $H = 6$  м (рис. 2.18).

Аналіз побудованих графічних залежностей вказує на те, що зміна кута нахилу осі вихідного сопла із  $0^0$  до  $45^0$  в усьому досліджуваному діапазоні решти факторів забезпечує зниження проникнення повітряного потоку в сапропель в межах 0,002...0,01м, що є недоцільним.

Також встановлено, що проникнення повітряного потоку у сапропель в горизонтальному напрямку для сапропелю вологістю  $W = 95 \pm 1$  % за тиску подачі повітря  $P_i = 300$  кПа становить 0,04 м, а для тиску  $P_i = 500$  кПа

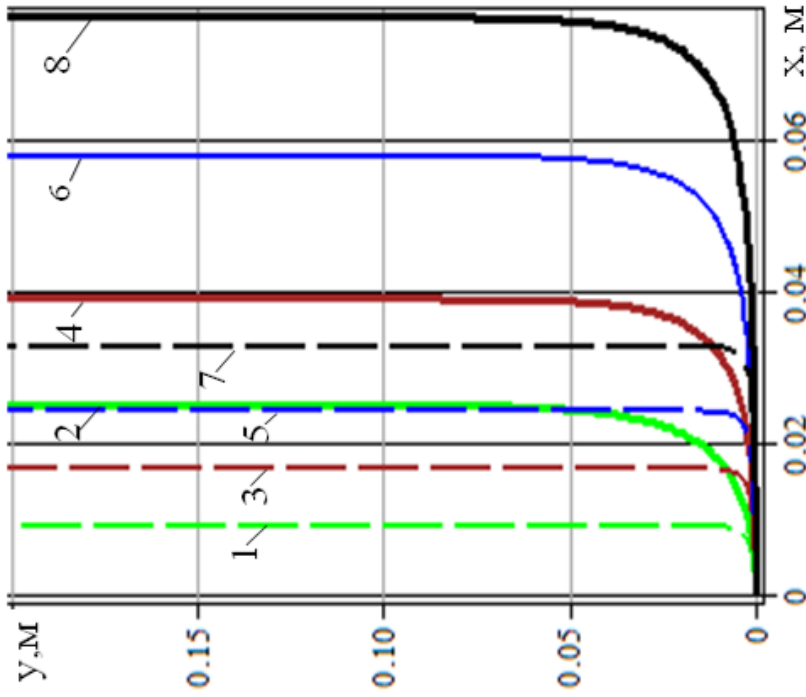


Рис. 2.11. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_1=95\pm 1\%$  після виходу із горизонтального сорла діаметром 1,0 мм заглибленого на 4 м за тиску подачі:  
 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа;  
 7-8 – 500 кПа

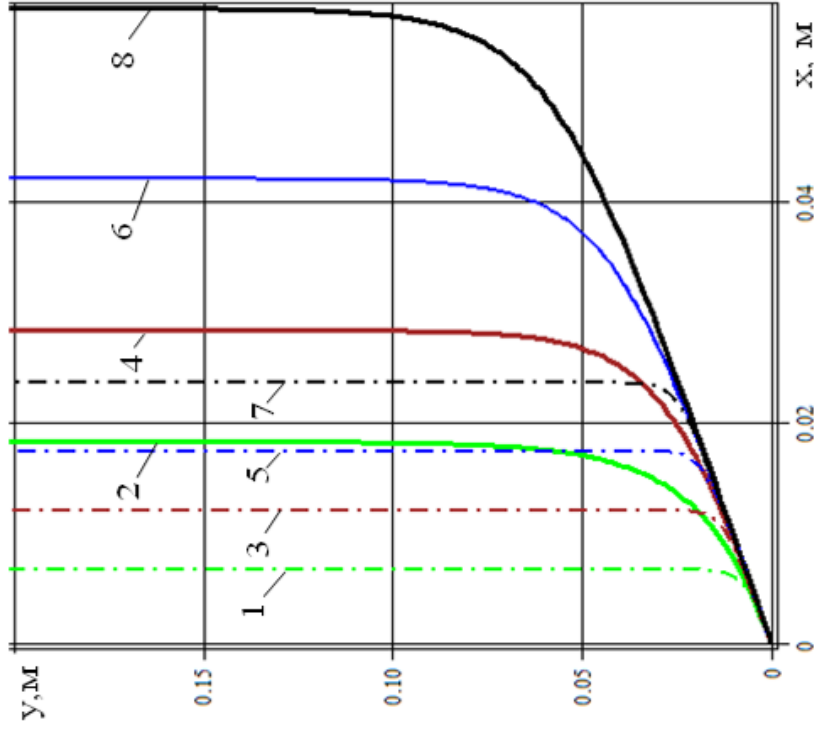


Рис. 2.12. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_1=95\pm 1\%$  після виходу із сопла діаметром 1,0 мм заглибленого на 4 м та відхиленого від горизонту на  $45^\circ$  за тиску подачі:  
 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа;  
 7-8 – 500 кПа

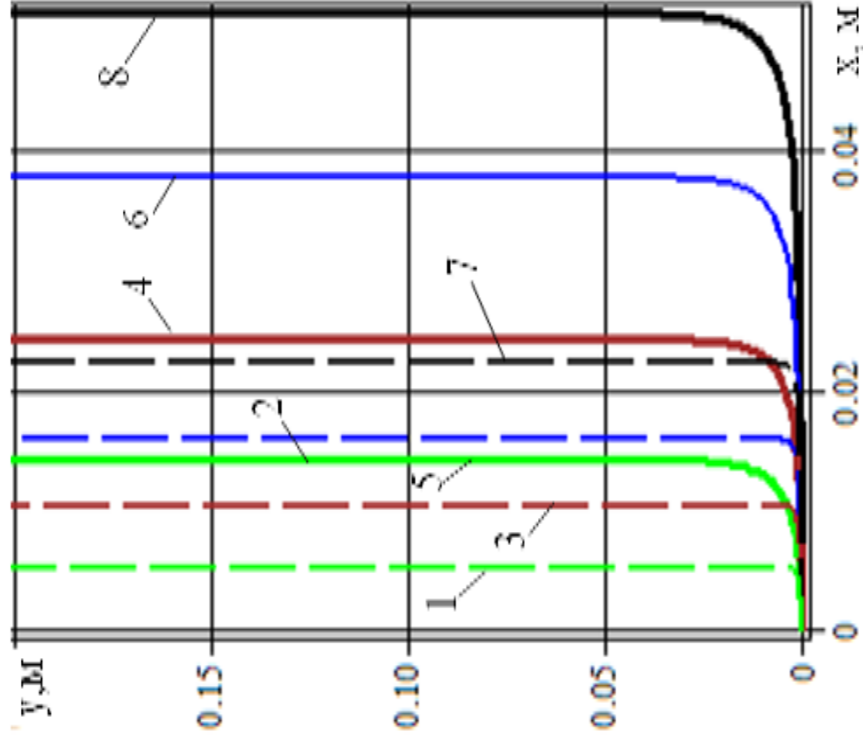


Рис. 2.13. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_1=90\pm 1\%$  після виходу із горизонтального сопла діаметром 1,0 мм заглибленого на 4 м за тиску подачі:  
 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа;  
 7-8 – 500 кПа

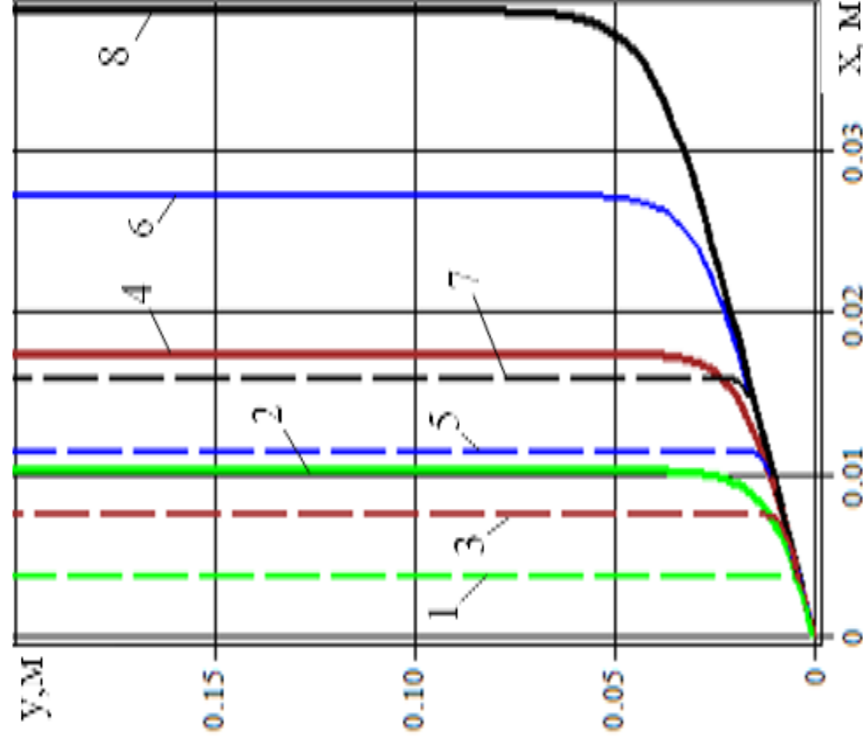


Рис. 2.14. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_1=90\pm 1\%$  після виходу із сопла діаметром 1,0 мм заглибленого на 4 м та відхиленого від горизонту на  $45^\circ$  за тиску подачі:  
 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа;  
 7-8 – 500 кПа



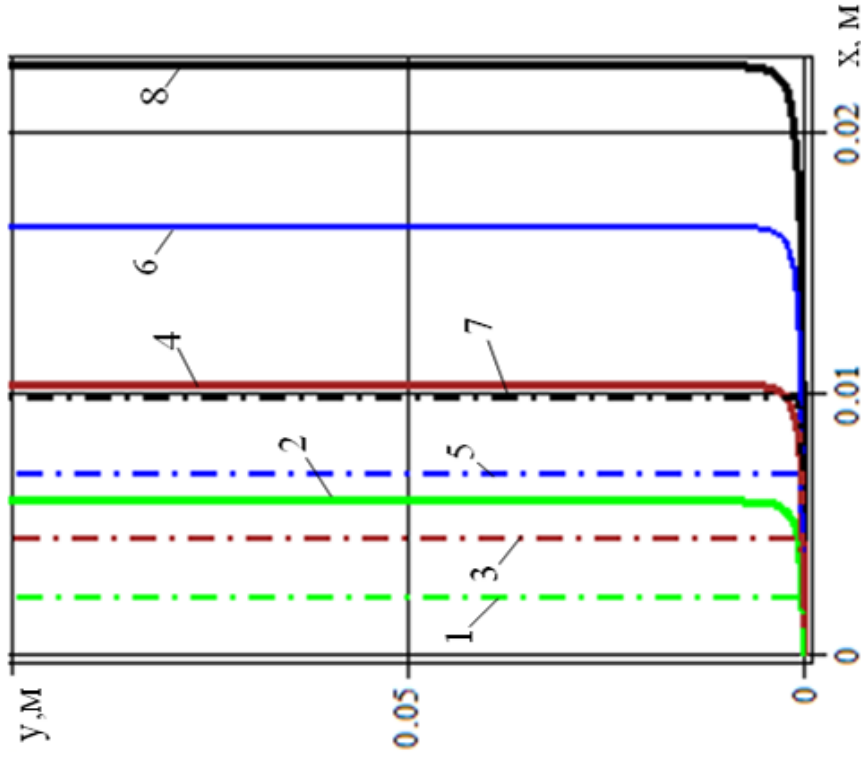


Рис. 2.15. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_1=85\pm 1\%$  після виходу із горизонтального сопла діаметром 1,0 мм заглибленого на 4 м за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

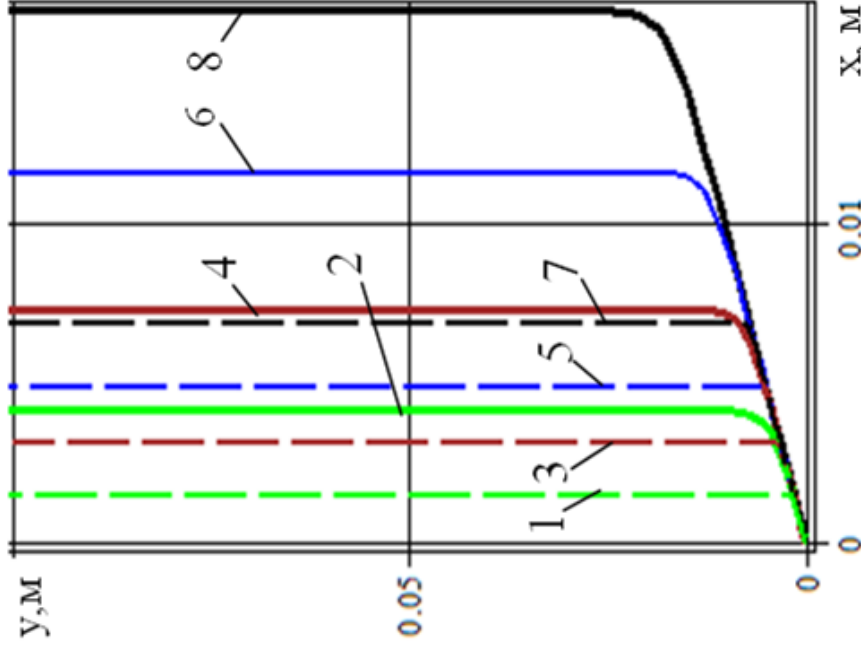


Рис. 2.16. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_1=85\pm 1\%$  після виходу із сопла діаметром 1,0 мм заглибленого на 4 м та відхиленого від горизонту на  $45^\circ$  за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

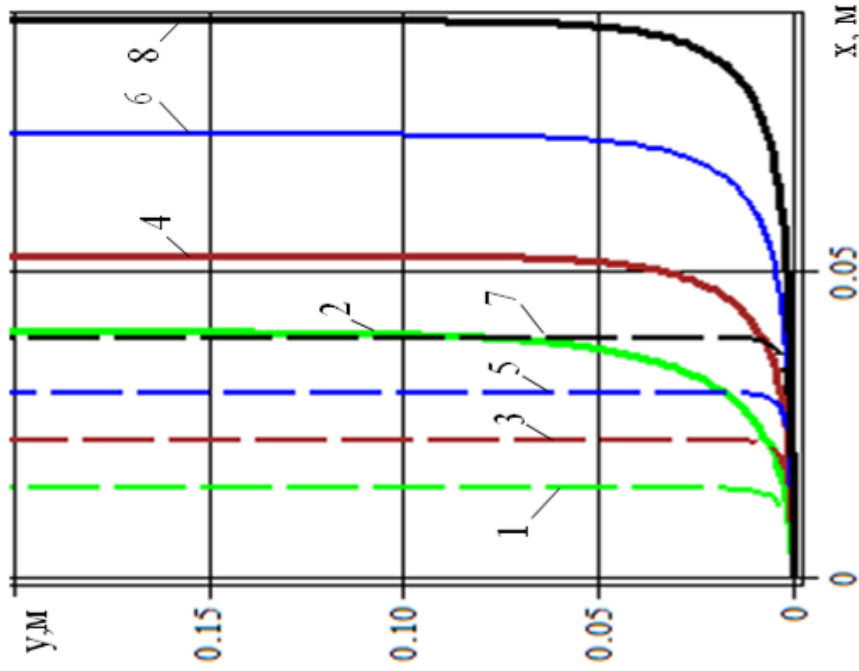


Рис. 2.17. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_1=95\pm 1\%$  після виходу із горизонтального сопла діаметром 1,0 мм заглибленого на 2 м за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

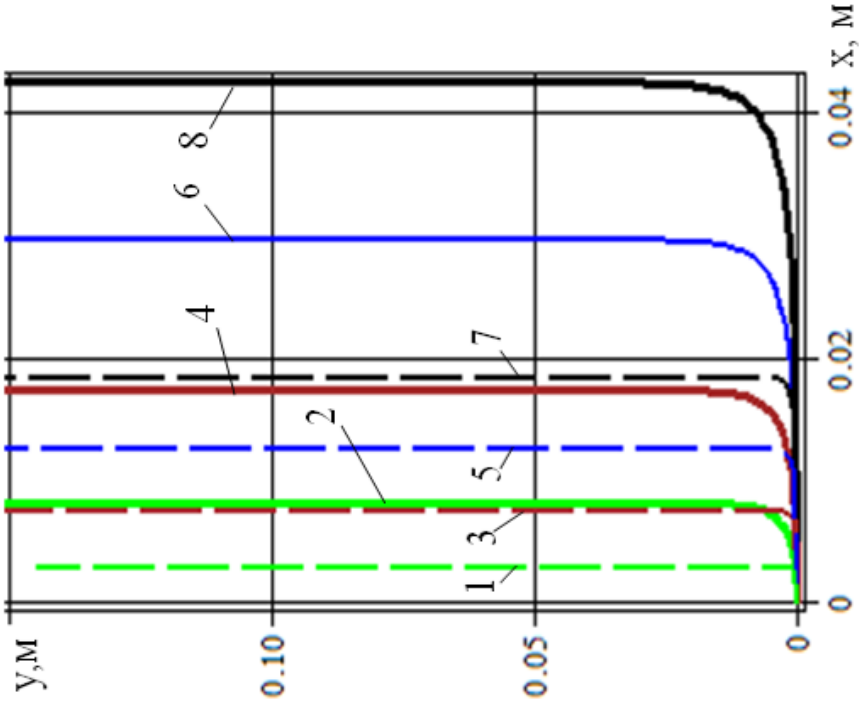


Рис. 2.18. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_1=90\pm 1\%$  після виходу із горизонтального сопла діаметром 1,0 мм заглибленого на 6 м за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

досягає 0,08 м (рис. 2.11). Для сапропелю вологістю  $W = 90 \pm 1$  % за тих же тисків даний параметр становить  $\approx 0,022$  м та  $\approx 0,055$  м (рис. 2.13). А для сапропелю вологістю  $W = 85 \pm 1$  % за тиску  $P_i = 500$  кПа максимальне значення координати  $x$  не перевищує  $\approx 0,012$  м (рис. 2.15).

Порівняння форми графічних залежностей на рис. 2.11 і рис. 2.17 та рис. 2.13 і рис. 2.18 вказує на те, що зростання глибини занурення забірною пристрою на 2 м призводить до зменшення координати  $x$  поширення повітряного потоку у межах 0,005...0,012 мм.

За допомогою даних графічних побудов встановлено, що охоплення повітряного потоку кінчним корпусом забірною пристрою буде забезпечуватись за кута нахилу твірної конуса, який знаходиться у межах  $\alpha_k = 20^\circ \dots 30^\circ$ .

## **2.5. Обґрунтування теоретичної об'ємної продуктивності забірною пристрою засобу для добування сапропелю**

Оскільки першочерговість процесу формування двокомпонентного середовища відбувається в змішувачі забірною пристрою засобу для добування сапропелю, а роботу по розрихленню, заборі та підйманні виконують потоки стиснутого повітря, припустимо, що з сопел напірного повітропроводу виходять окремі бульбашки повітря та рухаються за траєкторією отриманою у п. 2.4, до вивідного рукава пристрою. При цьому, кожна бульбашка виконує роботу, за якою можна обчислити сумарну теоретичну його продуктивність.

Для визначення максимальної теоретично можливої продуктивності забірною пристрою засобу для добування сапропелю обчислимо максимальну роботу, яку виконає сила Архімеда при підйомі бульбашки повітря об'ємом  $V_0$  (рис. 2.19).

Якщо бульбашка підіймається з глибини  $H$ , то тиск газу на відстані від вихідного сопла змішувача становитиме:

$$\mathcal{D} = \mathcal{D}_{a\partial i} + \overline{\rho_{\bar{n}}} \cdot g \cdot (H - y), \quad (2.26)$$

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

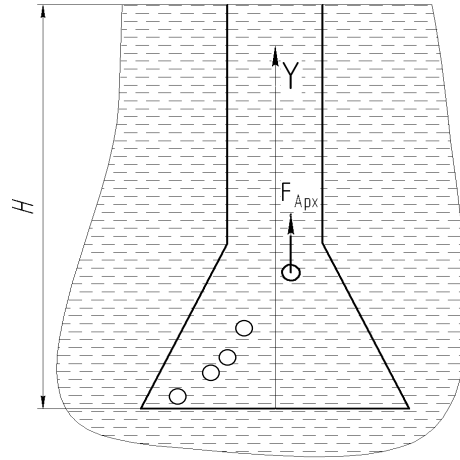


Рис. 2.19. Розрахункова схема щодо визначення теоретичної об'ємної продуктивності забірною пристроєм засобу для добування сапропелю

На бульбашку діятиме, лише виштовхувальна сила Архімеда, яка за величиною відповідно до (2.8) та з урахуванням (2.16) і (2.26) становитиме:

$$F_{Apx} = \frac{\mathcal{D}_{a\partial i} \cdot \overline{\rho_{\bar{n}}} \cdot g \cdot V_0}{\mathcal{D}_{a\partial i} + \overline{\rho_{\bar{n}}} \cdot g \cdot (H - y)}. \quad (2.27)$$

А робота сили Архімеда під час підйому бульбашки з глибини  $H$  на поверхню відповідно до (2.27) дорівнює:

$$A_{Apx} = \int_0^H F_{Apx} dy \quad (2.28)$$

або після підстановки  $F_{Apx}$  та інтегрування:

$$\begin{aligned} A_{Apx} &= \int_0^H \frac{\mathcal{D}_{a\partial i} \cdot \overline{\rho_{\bar{n}}} \cdot g \cdot V_0}{\mathcal{D}_{a\partial i} + \overline{\rho_{\bar{n}}} \cdot g \cdot (H - y)} dy = \mathcal{D}_{a\partial i} \cdot \overline{\rho_{\bar{n}}} \cdot g \cdot V_0 \int_0^H \frac{dy}{\mathcal{D}_{a\partial i} + \overline{\rho_{\bar{n}}} \cdot g \cdot H - \overline{\rho_{\bar{n}}} \cdot g \cdot y} = \\ &= \mathcal{D}_{a\partial i} \cdot V_0 \cdot \ln \left( \frac{\mathcal{D}_{a\partial i} + \overline{\rho_{\bar{n}}} \cdot g \cdot H}{\mathcal{D}_{a\partial i}} \right) = \mathcal{D}_{a\partial i} \cdot V_0 \cdot \ln \left( 1 + \frac{\overline{\rho_{\bar{n}}} \cdot g \cdot H}{\mathcal{D}_{a\partial i}} \right). \end{aligned} \quad (2.29)$$

З іншої сторони мінімальна робота, яку потрібно виконати для підйому з глибини  $H$  твердого чи рідкого (нестисливого) вантажу об'ємом  $V_c$  і густиною  $\rho_c$  становить:

$$A = \rho_c \cdot V_c \cdot g \cdot H - \overline{\rho_n} \cdot V_c \cdot g \cdot H = (\rho_c - \overline{\rho_n}) \cdot V_c \cdot g \cdot H. \quad (2.30)$$

Оскільки вантажем є сапропель, густина (об'ємна маса) якого змінюється із глибиною добування, то  $\rho_c$  є функцією від  $H$ , яка для досліджуваних покладів озера Зяцьке, має вид формули (4.5), то отримаємо:

$$A = (30,449 \cdot \dot{I} + 985,37 - \overline{\rho_n}) \cdot V_c \cdot g \cdot H. \quad (2.31)$$

Прирівнюючи (2.29) та (2.31) отримаємо:

$$V_c = \frac{D_{\dot{a}\dot{o}\dot{i}} \cdot V_0}{(30,449 \cdot \dot{I} + 985,37 - \overline{\rho_n}) \cdot g \cdot H} \ln \left( 1 + \frac{\overline{\rho_n} \cdot g \cdot H}{D_{\dot{a}\dot{o}\dot{i}}} \right) \quad (2.32)$$

Залежність (2.32) виражає максимально можливий об'єм сапропелів  $V_c$ , який може підняти з глибини  $H$  бульбашка повітря, об'єм якої за атмосферного тиску  $P_{атм}$  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 визначатиметься сумарною об'ємною подачею повітря  $Q_{nv}$  у пристрій. У такому випадку сумарна об'ємна продуктивність забірною пристрою становитиме:

$$V_{\Sigma c} = \frac{D_{\dot{a}\dot{o}\dot{i}} \cdot Q_{iv}}{(30,449 \cdot \dot{I} + 985,37 - \overline{\rho_n}) \cdot g \cdot H} \ln \left( 1 + \frac{\overline{\rho_n} \cdot g \cdot H}{D_{\dot{a}\dot{o}\dot{i}}} \right). \quad (2.33)$$

Рахуючи, що швидкість повітря є однаковою за усім перерізом вихідного круглого сопла та враховуючи, що добування відбувається за перепаду тисків, який є більшим-рівним від критичного значення (див. п. 2.3) то масову витрату через одне сопло напірного повітропроводу можна розрахувати за формулою [25].

$$Q_{im} = f \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{P_i^2}{RT_i}}, \quad (2.34)$$

де  $f$  – площа вихідного сичення сопла напірного повітропроводу.

З урахуванням площі сопла та їх кількості  $n$  напірного повітропроводу отримаємо:

$$Q_{im} = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{P_i^2}{RT_i}}, \quad (2.35)$$

де  $d$  – діаметр вихідного сопла напірного повітропроводу, м.

Із (2.35) з урахуванням (2.5) отримаємо:

$$Q_{iv} = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \mu \cdot P_{\dot{a} \dot{o} i}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T_i \cdot P_i^2}. \quad (2.36)$$

Тоді на основі (2.33) з урахуванням (2.36) запишемо:

$$V_{\Sigma c} = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{(30,449 \cdot \dot{I} + 985,37 - \bar{\rho}_{\dot{n}}) \cdot 4 \cdot \mu \cdot g \cdot H} \times \\ \times \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T_i \cdot P_i^2} \times \ln \left( 1 + \frac{\bar{\rho}_{\dot{n}} \cdot g \cdot H}{D_{\dot{a} \dot{o} i}} \right). \quad (2.37)$$

На практиці діють сили опору руху у підйимальному трубопроводі і відбувається зворотній хід вантажу, тому рівність (2.37) слід записати у вигляді нерівності:

$$V_{\Sigma c} \leq \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{(30,449 \cdot \dot{I} + 985,37 - \bar{\rho}_{\dot{n}}) \cdot 4 \cdot \mu \cdot g \cdot H} \times \\ \times \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T_i \cdot P_i^2} \times \ln \left( 1 + \frac{\bar{\rho}_{\dot{n}} \cdot g \cdot H}{D_{\dot{a} \dot{o} i}} \right). \quad (2.38)$$

Дана нерівність не дозволяє точно визначити продуктивність забірною пристрою, але за її допомогою можна відслідкувати вплив на даний показник тиску подачі повітря та глибини з якої здійснюється добування. З цією метою за формулою (2.37) побудована графічна залежність (рис. 2.20).

Побудована графічна залежність 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. Також доцільно вести добування за тиску подачі  $P_i = 400 \dots 450$  кПа.

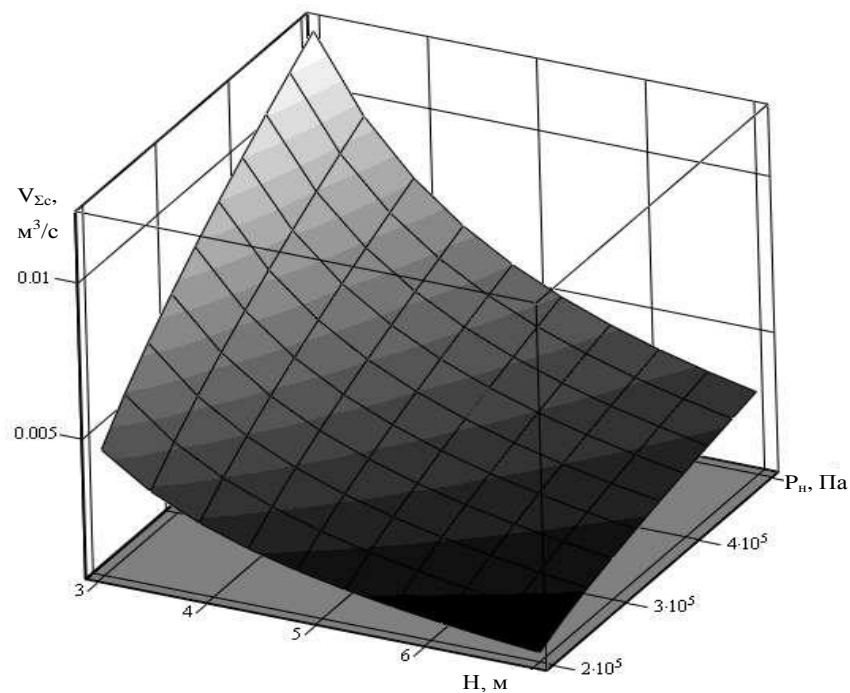


Рис. 2.20. Залежність максимальної теоретичної продуктивності  $V_{\Sigma c}$  забірною пристрою від глибини добування  $H$  та тиску подачі повітря  $P_i$

Такий висновок спричинений тим, що за нижчих тисків відбувається падіння продуктивності  $V_{\Sigma c}$ . Обмеження верхньої межі тисків спричинена тим, що у якості джерела подачі стисненого повітря у пропонованому засобі для добування сапропелю використовується одноступінчастий поршневий компресор для якого збільшення тиску нагнітання понад 450 кПа веде до різкого зниження індикаторного ККД [113]. Досягти збільшення тиску подачі можна шляхом використання поршневих компресорів із більшою кількістю ступенів або ж іншого типу нагнітальних машин, але це пов'язано із ускладненням їх конструкції, а отже і із зростанням вартості та затрат на експлуатацію.

## 2.6. Дослідження закономірності зміни об'ємного газовмісту за висотою змішувача забірною пристрою

Як зазначалось у п. 2.2 основною характеристикою, яка визначає перехід бульбашкового режиму руху газорідної суміші є об'ємний газовміст, який розраховують за формулою (2.1). Також з аналізу процесу формування

газорідинної суміші у змішувачі (конічному корпусі) забірному пристрою, можна зробити висновок, що за постійної подачі повітря, об'ємний газовміст за висотою буде змінюватись. Тому з метою встановлення закономірності зміни об'ємного газовмісту за висотою змішувача забірному пристрою розглянемо деяке довільне січення повітряно-сапропелевої суміші висотою  $\Delta h \rightarrow 0$  розташоване на віддалі  $y_i$  від осей вихідних сопел кільцевого напірного повітропроводу (рис. 2.21).

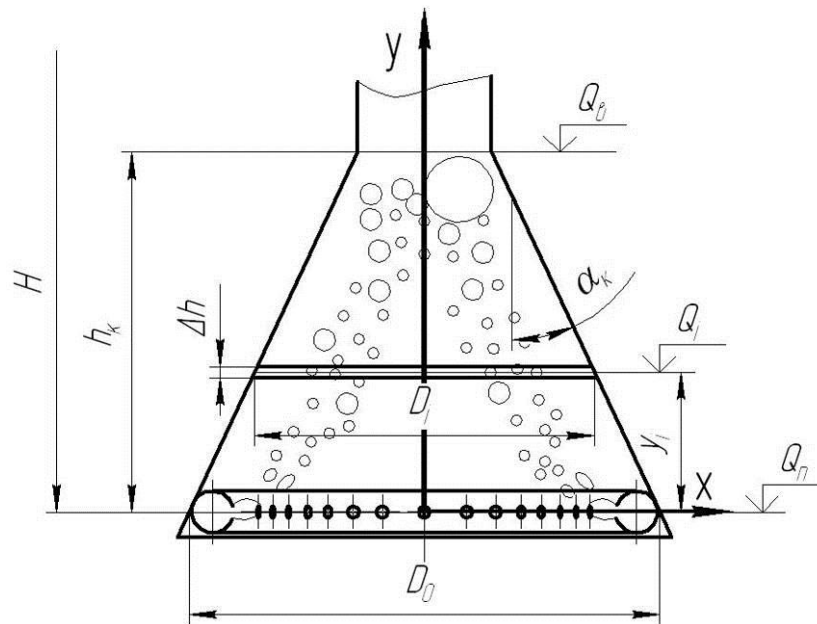


Рис. 2.21. Схема до визначення закономірності розподілу об'ємного газовмісту за висотою змішувача забірному пристрою.

Оскільки висота виділеного перерізу  $\Delta h \rightarrow 0$  то об'ємний газовміст для даної координати  $y_i$  буде рівний:

$$\varphi_h(y_i) = \frac{S_{\text{віа}}(y_i)}{S_{\Sigma}(y_i)}, \quad (2.39)$$

де  $S_{\text{віа}}(y_i)$  – площа яку у розглядуваному перерізі займає повітря,  $\text{м}^2$ ;

$S_{\Sigma}(y_i)$  – сумарна площа розглядуваного перерізу,  $\text{м}^2$ .

Сумарна площа становить:

$$S_{\Sigma}(y_i) = \pi \cdot f^2(y_i), \quad (2.40)$$



де  $f(y_i)$  – функція, якою задається рівняння твірної бічної поверхні змішувача (конічного корпусу) забірною пристрою.

Для розглядуваного випадку конічного корпусу забірною пристрою така функція має вигляд:

$$x = f(y) = \frac{D_0}{2} - y \cdot \operatorname{tg} \alpha_\epsilon, \quad (2.41)$$

де  $D_0$  – діаметр конічного корпусу на рівні осей вихідних сопел кільцевого напірного повітропроводу, м;

$\alpha_\epsilon$  – кут відхилення від вертикалі твірної конічного корпусу, град.

Тоді

$$S_{\sigma}(y_i) = \pi \cdot \left( \frac{D_0}{2} - y_i \cdot \operatorname{tg} \alpha_\epsilon \right)^2. \quad (2.42)$$

Площу  $S_{\sigma}(y_i)$ , яку у розглядуваному перерізі займає повітря визначимо із наступних міркувань. Оскільки із умови нерозривності повітряного потоку у змішувачі справедливою є рівність:

$$Q_{im} = Q_{\hat{a}m} = Q_m, \quad (2.43)$$

де  $Q_{im}$  – масова подача повітря у змішувач, кг;

$Q_{\hat{a}m}$  – масова витрата повітря через вихідний отвір конічного корпусу забірною пристрою, кг;

$Q_{\hat{a}m}$  – масова витрата повітря через виділений переріз, кг,

то об'ємна витрата повітря через виділений переріз з урахуванням формули (2.36) та (2.26) становитиме:

$$Q_{iv}(y_i) = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T_i \cdot P_i^2}}{4 \cdot \mu \cdot \left( D_{\hat{a}i} + \bar{\rho}_n \cdot g \cdot (H - y_i) \right)}. \quad (2.44)$$

З іншої сторони об'ємна витрата повітря через і-тий переріз становить:

$$Q_{iv}(y_i) = S_{\sigma}(y_i) \cdot v_y(y_i), \quad (2.45)$$

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

Прирівнявши праві частини виразів (2.44) та (2.45) отримаємо:

$$S_{iia.}(y_i) = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T_i \cdot P_i^2}}{4 \cdot \mu \cdot \left(D_{a\delta i} + \bar{\rho}_{\bar{n}} \cdot g \cdot (H - y_i)\right) \cdot v_y(y_i)}. \quad (2.46)$$

Враховуючи, що формула (2.39) для визначення об'ємного газовмісту записана для довільного перерізу, а також вирази (2.42) та (2.46) отримаємо:

$$\varphi_h(y) = \frac{n \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T_i \cdot P_i^2}}{4 \cdot \mu \cdot \left(D_{a\delta i} + \bar{\rho}_{\bar{n}} \cdot g \cdot (H - y)\right) \cdot v_y(y) \cdot \left(\frac{D_0}{2} - y \cdot \operatorname{tg} \alpha_e\right)^2}. \quad (2.47)$$

Отримана залежність разом із розрахованою за моделлю (2.17) вертикальною складовою швидкості повітряного потоку  $v_y(y)$  дозволяє отримати закономірність зміни об'ємного газовмісту за висотою змішувача.

Для дослідження впливу конструктивних параметрів конічного корпусу забірної пристрою на зміну об'ємного газовмісту у середовищі Maple були побудовані графічні залежності даного параметра (рис. 2.22).

Із отриманих графічних залежностей можна зробити висновок, що за кута нахилу твірної конічного корпусу  $\alpha_e = 20^\circ$  досягнення об'ємного газовмісту, що відповідає появі снарядного режиму руху, відбуватиметься на віддалі 0,1...0,2 м від вхідного вікна. Для змішувача із  $\alpha_e = 30^\circ$  необхідний газовміст досягатиметься на віддалі 0,08...0,17 м. Збільшення глибини добування спричиняє незначне видовження зони досягнення граничного газовмісту. Також не значним є вплив на даний параметр зростання тиску подачі повітря із  $P_i = 400 \text{ еї } \text{à}$  до  $P_i = 500 \text{ еї } \text{à}$ . Узагальнюючи можна відмітити, що для забезпечення формування у конічному корпусі забірної пристрою стійкого снарядного режиму руху повітряно-сапропелевої суміші, його висота повинна знаходитись у межах  $h_e = 0,18...0,32 \text{ м}$ . За таких значень  $h_e$ , кута  $\alpha_e = 20^\circ...30^\circ$  та  $D_0 = 0,3...0,4 \text{ м}$  діаметр вхідного отвору змішувача

знаходиться у межах  $D_{\hat{a}}=0,09...0,14$  м, відповідно до якого буде приєднуватись піднімальний трубопровід таких же розмірів  $d=0,09...0,14$  м.

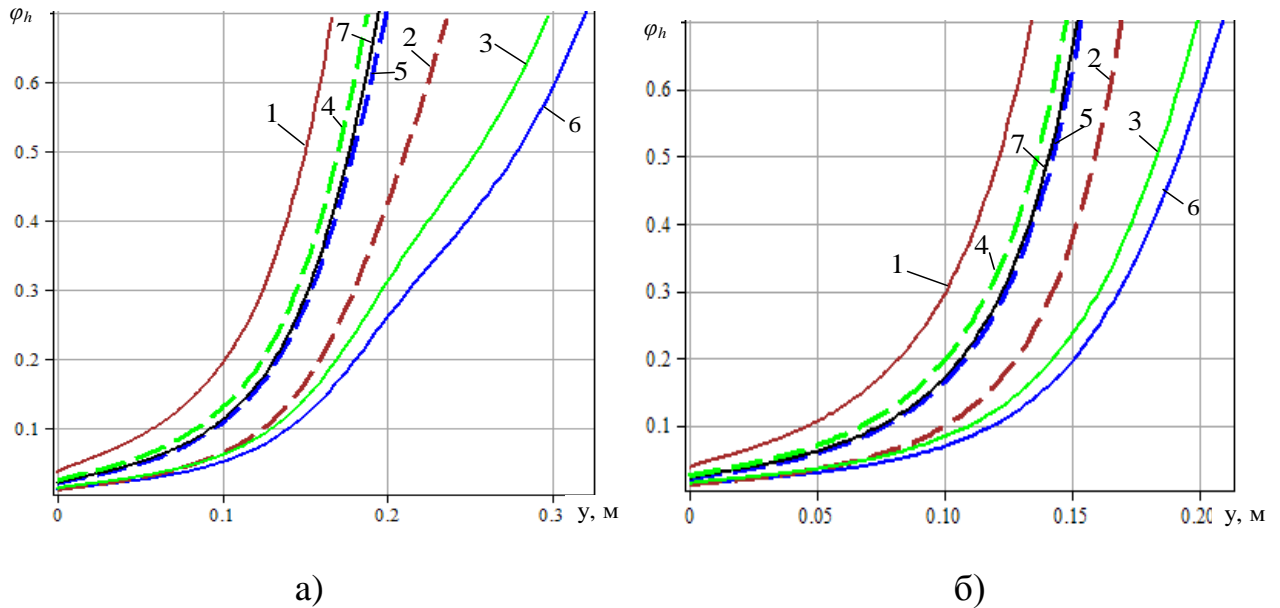


Рис. 2.22. Залежність об'ємного газомісту  $\varphi_h$  з висотою змішувача за:  
 а -  $\alpha_k=20^\circ$ ; б -  $\alpha_k=30^\circ$ : 1.  $D_0=0,3$  м,  $H=4$  м,  $n=60$ ,  $P_H=500$  кПа; 2.  $D_0=0,3$  м,  $H=4$  м,  $n=20$ ,  $P_H=500$  кПа; 3.  $D_0=0,4$  м,  $H=4$  м,  $n=40$ ,  $P_H=500$  кПа; 4.  $D_0=0,3$  м,  $H=4$  м,  $n=40$ ,  $P_H=500$  кПа; 5.  $D_0=0,3$  м,  $H=4$  м,  $n=40$ ,  $P_H=400$  кПа; 6.  $D_0=0,4$  м,  $H=4$  м,  $n=40$ ,  $P_H=400$  кПа; 7.  $D_0=0,3$  м,  $H=6$  м,  $n=40$ ,  $P_H=500$  кПа.

## 2.7. Висновки до розділу 2

На підставі проведених теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Синтез пневматичних засобів для добування сапропелю дозволив отримати конструкцію забірної пристрою, що входить до складу засобу для добування сапропелю та обґрунтувати процес його роботи, який максимально відповідає вимогам до добутої сировини.
2. Аналіз робочого процесу забірної пристрою засобу для добування сапропелю дозволив розкрити фізичну суть процесів, які відбуваються у даному пристрої, теоретично обґрунтувати доцільність використання конічного

корпусу (змішувача) у забірному пристрої і виявити напрями подальшого удосконалення останнього.

3. Отримана математична модель руху повітряного потоку у середовищі сапропелю у вигляді системи диференційних рівнянь (2.17), яка дозволяє дослідити вплив конструктивно-технологічних параметрів процесу добування сапропелю на форму повітряного потоку.

4. Запропоновано залежність для розрахунку максимальної теоретичної продуктивності забірною засобу для добування сапропелю (2.37), яка розкриває вплив на продуктивність тиску подачі повітря та глибини з якої здійснюється добування.

5. Отримана закономірність розподілу об'ємного газомісту за висотою кінцевого корпусу (змішувача) забірною пристрою (2.47), дозволила встановити межі його конструктивно-технологічних параметрів за яких відбуватиметься формування снарядної структури повітряно-сапропелевого потоку у піднімальному трубопроводі.

## РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1. Програма експериментальних досліджень

Визначені експериментально фізичні властивості сапропелю забезпечують практичне застосування залежностей отриманих під час теоретичного обґрунтування параметрів пневматичного забірної пристрою засобу для добування сапропелів. Також експериментальні дослідження дозволяють перевірити адекватність теоретичних обґрунтувань.

Досліджуваний пневматичний забірний пристрій планується використовувати для добування органічного сапропелю з підводних родовищ, з метою забезпечення сільського господарства безпосередньо органічними добривами або ж якісною сировиною природної вологості для створення компостів та комплексних добрив на основі сапропелю, оскільки даний тип сапропелю є найбільш цінним матеріалом для приготування вищевказаних добрив.

Лабораторно-виробничі випробування забірної пристрою проводились на озері Зяцьке Старовижівського р-ну, Волинської обл. де знаходяться поклади органічного сапропелю, тому і всі експериментальні дослідження проводились з сапропелями відібраними на даному озері.

В програму експериментальних досліджень входило:

1. Дослідити закономірність зміни із глибиною залягання наступних фізичних властивостей сапропелю:
  - а) природної вологості;
  - б) зольності;
  - в) об'ємної маси.
2. Встановити в'язкість сапропелю.
3. Дослідити траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості.

4. Дослідити вплив відносного занурення забірною пристрою та тиску подачі повітря на продуктивність та структуру руху двохкомпонентного середовища повітря-сапропель у висхідній течії вертикального трубопроводу.

5. Провести лабораторно-виробничі випробування пневматичного забірною пристрою із обґрунтованими у результаті дослідження параметрами в складі засобу для добування сапропелю.

### 3.2. Прилади, обладнання та апаратура для проведення досліджень

Для відбору зразків сапропелю із фіксованих глибин покладів використовували сапропелерозвідувальний бур (рис. 3.1; 3.2.), який складається із пробовідбірною човника із рухомим 1 і нерухомим 2 півциліндрами, у верхній частині останнього приєднуються подовжувальні штанги 3, які з'єднуються фіксаторами 4, та ручки 5. Загальна довжина штанг вибирається залежно від глибини відбору проби.

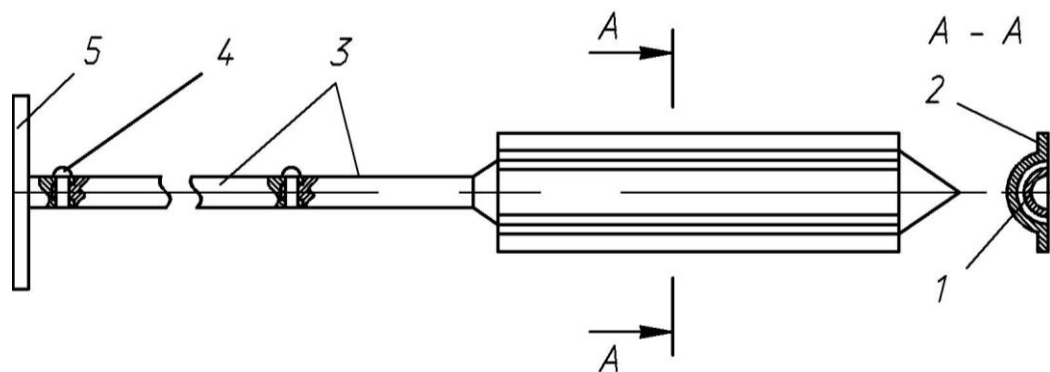


Рис. 3.1. Схема сапропелерозвідувального бура

Для визначення вологості сапропелю використовувалось таке лабораторне обладнання: сушильна електрошафа СНОЛ - 3,5.3,5.3,5/3 ИЗ з діапазоном автоматичного регулювання температури в робочому просторі від  $+50$  до  $+350^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.3, а); електронні ваги ТВЛ-0,5 (рис. 3.3, в); термометр-щуп електронний ТФА 301018 (рис. 3.3, д); ексікатор та алюмінієві бюкси (рис. 3.3, г).

Під час визначення зольності сапропелю використовували муфельну електропіч СНОЛ – 1,6.2,5.1/11 ИЗ з діапазоном автоматичного регулювання

температури в робочому просторі від 0 до  $+1100^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.3 б), та фарфорові бюкси (рис. 3.3, е).



Рис. 3.2. Фото сапропелерозвідувального бура: 1 – пробовідбірний човник; 2 – подовжувальні штанги з фіксаторами



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 3.3. Прилади та обладнання для проведення досліджень: а – сушильна електрошафа СНОЛ – 3,5.3,5.3,5/3 ИЗ; б – муфельна електропіч СНОЛ – 1,6.2,5.1/11 ИЗ; в – електронні ваги ТЛВ-0,5; г – ексикатор із бюксами; д – термометр-щуп електронний TFA 301018; е – фарфорові бюкси

Для дослідження в'язкості сапропелю була розроблена та виготовлена лабораторна установка, принцип роботи якої базується на ротаційному методі дослідження (рис. 3.4).

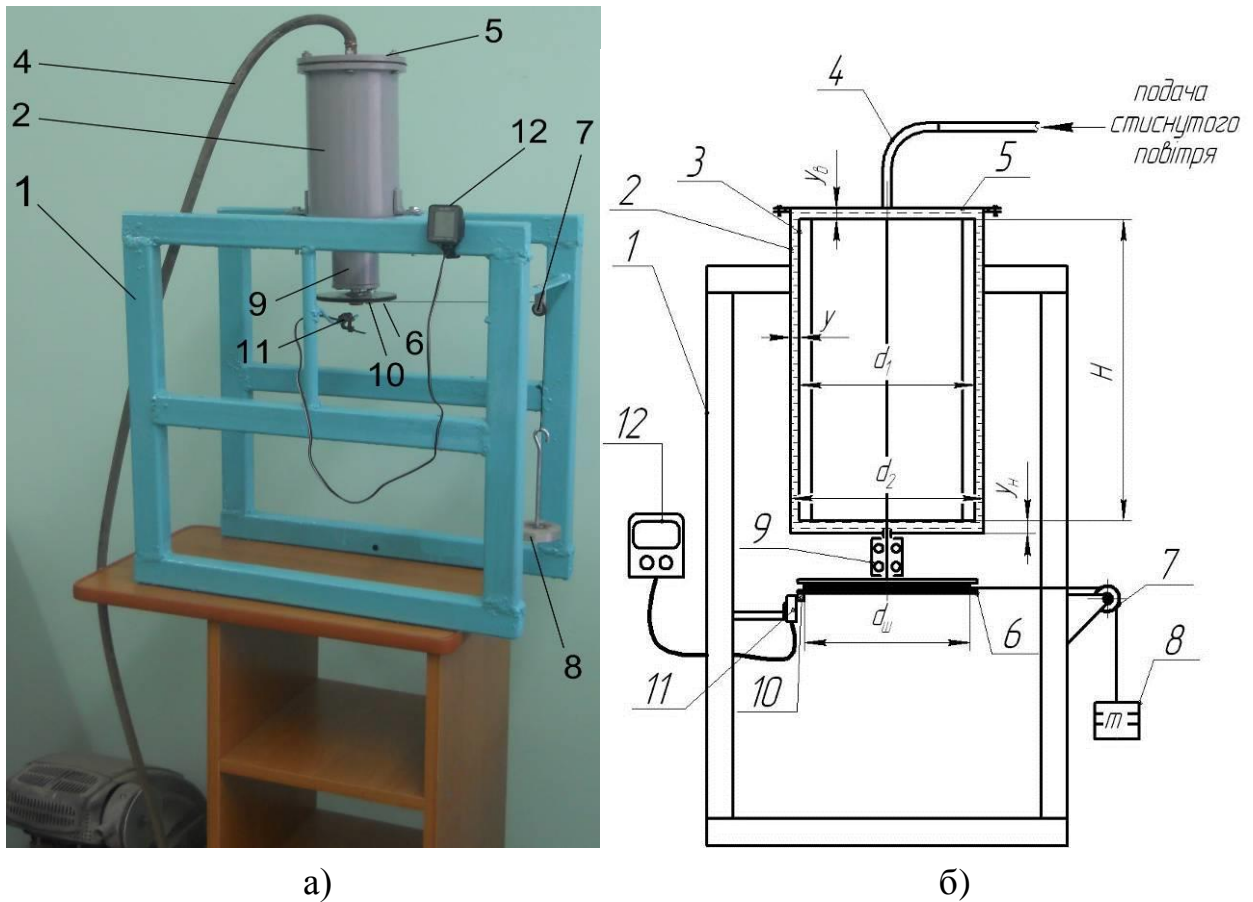


Рис. 3.4. Установка для дослідження в'язкості сапропелю: а– фото; б – схема; 1 – рама; 2 – зовнішній циліндр; 3 – внутрішній циліндр; 4 – магістраль подачі стиснутого повітря; 5 – кришка зовнішнього циліндра; 6 – привідний шків; 7 – блок; 8 – вантаж; 9 – блок підшипників; 10 – постійний магніт; 11 – давач; 12 – вимірювальний прилад

Основою даної установки є зовнішній 2 та внутрішній 3 циліндри. У кільцевому проміжку між цими циліндрами розташовується досліджуваний матеріал, а герметизація зовнішнього циліндра забезпечується кришкою 5. Обертовий рух внутрішньому циліндру надається через шків 6 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 шківу закріплений постійний магніт 10, а на рамі 1 – давач 11. Давач у свою чергу з'єднаний провідником із вимірювальним приладом, який фіксує числове значення максимальної частоти обертання внутрішнього циліндра.

Під час дослідження траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості використовувалась установка зображена на рис. 3.5.

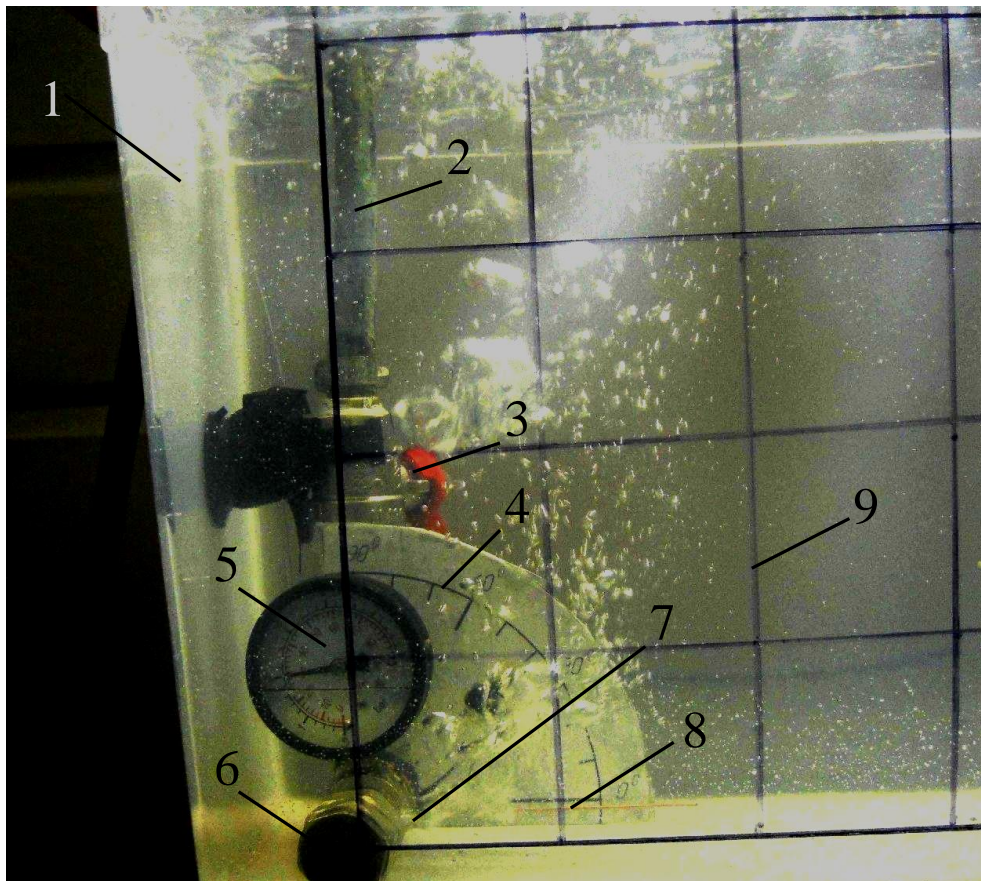


Рис. 3.5. Фото установки для дослідження руху повітряного струменю у рідинах різної в'язкості

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 встановленого діаметру. Для подачі повітря від компресора у повітропровід використовується гнучкий армований шланг 2. Грубе регулювання тиску подачі повітря здійснювалось вентилем установки 3, а точне – золотниковим механізмом компресора. Поточне значення тиску виходу повітря із сопла реєстрували за манометром 5. Для визначення кута нахилу осі сопла до горизонту на повітропровід 6

співвісно із ним кріпилась стрілка 8, а на корпусі вентиля шкала 4 проградуєвана у градусах. 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; 1,5 мм.

Фіксація траєкторії руху повітряного потоку у середовищі рідин здійснювалась за допомогою встановленої на штативі цифрової фотокамери NIKON COOLPIX L22.

Оскільки добування сапропелю відбувається з підводних родовищ, а сам 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. 3.6).

Дана установка містить корпус 1 у вигляді ємкості, передня стінка якої виготовлена з прозорого пластику, і призначена для візуального спостереження за процесами, що відбуваються в середовищі сапропелю. Також до передньої прозорої стінки корпусу герметично кріпиться поздовжній розріз забірної пристрою із пневматичним змішувачем (відповідно до схеми описаної у п. 2.1). Змішувач у свою чергу складається із конуса 2, у нижній частині якого закріплений напірний повітропровід 6 із соплами. До конуса приєднаний піднімальний трубопровід 4. Подача стиснутого повітря від компресора до сопел напірного повітропроводу здійснюється через магістраль 3. Надходження сапропелю із підйомального трубопроводу до мірної посудини 5 забезпечується гнучкою трубою.

Для живлення пневматичних магістралей лабораторних установок зображених на рис. 3.4 – 3.6 стиснутим повітрям використовувався компресор EURO 210/24 основні технічні параметри якого наведені у табл. 3.1.

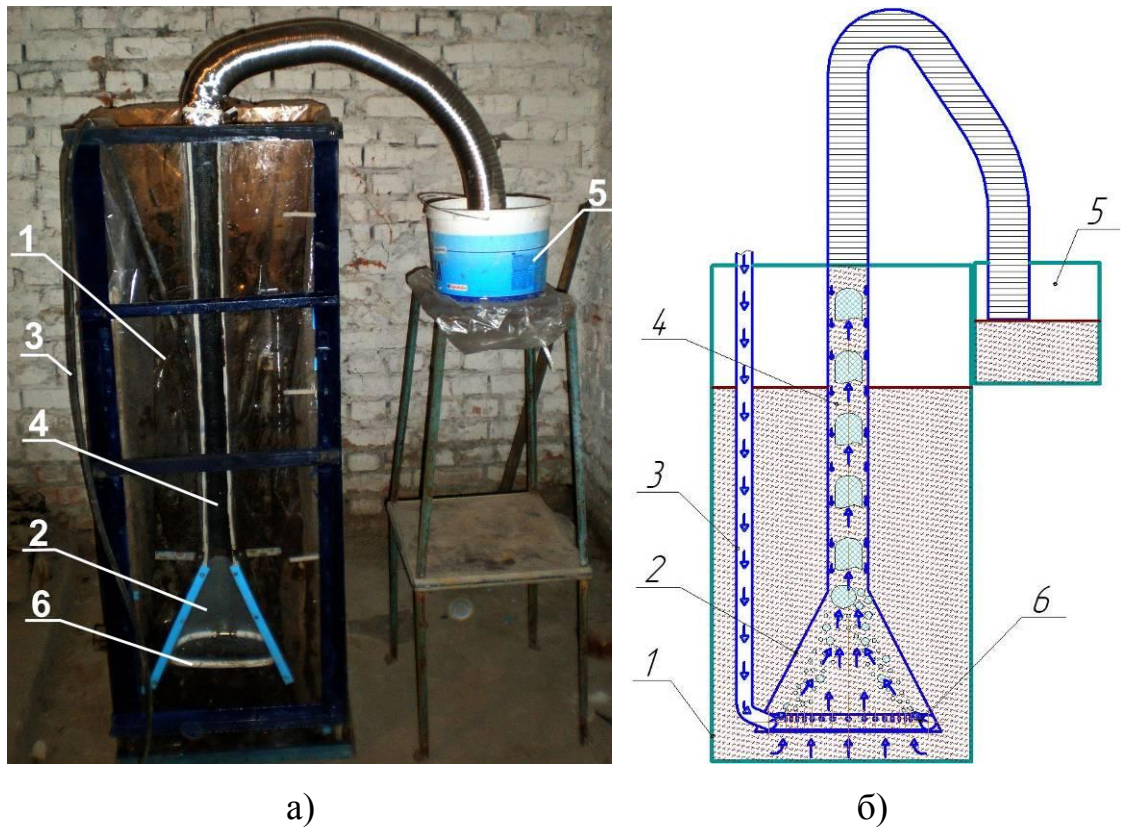


Рис.3.6. Експериментальна установка: а – фото; б – схема; 1 – корпус, 2 – конус у розрізі, 3 – магістраль подачі стиснутого повітря, 4 – піднімальний трубопровід у розрізі, 5 – мірна посудина, 6 – напірний повітропровід з отворами

Таблиця 3.1

Технічна характеристика компресора EURO 210/24

Параметр	Розмірність	Величина
Продуктивність	л/хв	206
Об'єм ресивера	л	24
Максимальний робочий тиск	кПа	800
Потужність встановленого електродвигуна	кВт	1,5
Маса	кг	26

### 3.3. Методика відбору зразків сапропелю

Згідно програми експериментальних досліджень проводились роботи із відбору зразків сапропелю з озера Зяцьке.

Відбір проб сапропелевих покладів проводився за допомогою сапропелерозвідувального бура (рис. 3.1, 3.2) з човна. Проби відбиралися в чотирьох точках (перпендикулярно до довжини озера від берега до берега). Відлік залягання покладів сапропелів починали з моменту входу пробовідбірника у верхній шар (пелоген).

Визначення загальної глибини покладів сапропелю проводили з точністю до 0,1 м. При зондуванні визначили глибину води та загальну глибину покладів (від їх поверхні до мінерального дна). Зразки сапропелів відбирали від поверхні покладів через кожні 1 м до мінерального дна.

Для відбору проби човник бура занурювали у відклади в відкритому стані на необхідну глибину (вперше на глибину 1 м). Повертаючи ручку за годинниковою стрілкою на  $180^{\circ}$  закривали човник і витягували з відкладів бур. Після чого горизонтально розміщували останній, відкривали його та набирали в попередньо пронумеровані бюкси і закривали кришками. В одній зондувальній точці з кожної глибини відбирали тільки одну пробу. На всі відібрані проби складалась відомість лабораторних аналізів. Остання, разом з відбірними пробами, відправлялась в лабораторію. В лабораторії, звіривши номери бюксів з відомістю лабораторних аналізів, відповідні проби ретельно перемішувались, ділились на п'ять рівних частин. З кожної частини відбирали приблизно 30 г сапропелю для визначення відповідно вологості і зольності відкладів.

#### **3.4. Методика визначення природної вологості сапропелю**

З підготовленої пошарової проби сапропелю, яка попередньо перемішувалась до однорідної суміші в мірній ємкості, із чотирьох точок відбирали наважки масою 5 г і поміщали в попередньо пронумеровані та просушені дюралюмінієві бюкси. Сапропелеву масу важили з точністю до 0,01 г. Після цього бюкси поміщали у нагріту сушильну шафу.

Сушильну шафу нагрівали до  $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ; та підтримували цю температуру на протязі усього періоду дослідження. Після 120 хвилин сушіння бюкси з

матеріалом виймали з шафи і охолоджували до кімнатної температури. Охолоджені бюкси зважували і знову повертали у сушильну шафу. Наступні зважування проводили через 20 хвилин.

Дані зважування показали, що час сушіння не достатній, оскільки різниця в масі після 120 та після 140 хвилин сушіння перевищувала 0,01 г.

Дослідження проводили далі із збільшенням часу сушіння. Наступний час сушіння становив 160 та 180 хвилин. Після чого дослід припиняли, оскільки різниця маси сапропелю між часом сушіння 160 та 180 хвилин не перевищувала 0,01г. При збільшенні маси наважки для розрахунків приймали її мінімальне значення, яке було за часу сушіння 160 хвилин.

Дослідження з визначення природної вологості проводились одночасно для трьох наважок у відповідності до відібраних проб, які були добуті з певної глибини залягання, що була кратною одному метру.

Вміст води ( $W$ ) у відсотках обчислювали за формулою:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100\%, \quad (3.1)$$

де  $m_1$  – маса бюкса з наважкою до висушування, кг;

$m_2$  – маса бюкса з наважкою після висушування, кг;

$m$  – маса наважки, кг.

### 3.5. Методика визначення зольності покладів

Після визначення вмісту природної вологості згідно п. 3.4 зразок сапропелю з алюмінієвих бюксів поміщали у фарфорові попередньо їх просушивши та зваживши. При цьому дотримувалась послідовність наважок відповідно з глибиною залягання покладів. Далі фарфорові бюкси з сапропелем розміщали в холодній муфельній печі і поступово (протягом 1 години) нагрівали до температури 800<sup>0</sup>С, яку підтримували на протязі 1 години. Після прожарювання фарфорові бюкси із зольним залишком виймали із печі і охолоджували 5 хвилин на повітрі, а потім в ексикаторі до кімнатної температури. Охолоджені фарфорові бюкси зважували.

Для контролю фарфорові бюкси з зольним залишком прожарювали протягом 30 хвилин при температурі 800<sup>0</sup>С. Охолоджені фарфорові бюкси повторно зважували. Якщо різниця в масі не перевищувала 0,05 г досліди припиняли. При зміні маси більше 0,05г проводили контрольне прожарювання.

Зольність сапропелю розраховувалась згідно наступної залежності:

$$A^c = \frac{m_1 \cdot 100\%}{m}, \quad (3.2)$$

де  $m_1$  – маса золи, кг;

$m$  – маса наважки сухого сапропелю, кг.

### 3.6. Методика визначення об'ємної маси сапропелю

Визначення об'ємної маси проводили з використанням мірної посудини, а саме бюксів описаних в п. 3.2 (рис.3.1 г). Попередньо визначивши внутрішній об'єм посудини, шляхом визначення об'єму води, що вона вміщує.

Під час визначення об'ємної маси, бюкси встановлювали на горизонтальну поверхню та наповнювали їх досліджуваним зразком сапропелю. Завантаження припиняли, коли об'єм бюксу був заповнений більше ніж на 100%. Далі за допомогою леза зрізали надлишок досліджуваного матеріалу та вирівнювали його поверхню. Матеріал, що залишивсь у посудині важили з точністю до 0,01г і визначали його об'ємну масу за формулою:

$$\gamma_0 = (m - m_0)/V, \quad (3.3)$$

де  $\gamma_0$  – насипна об'ємна маса, кг/м<sup>3</sup>;

$m$  – маса посудини з матеріалом, кг;

$m_0$  – маса порожньої посудини, кг;

$V$  – внутрішній об'єм посудини, м<sup>3</sup>.

Для зменшення похибки отриманих результатів, досліди проводили із чотирьохкратною повторюваністю (рис. 3.7).





Рис 3.7. Визначення об'ємної маси сапропелю

### 3.7. Методика визначення в'язкості сапропелю

Методика визначення в'язкості сапропелю розроблена на основі відомих методик для ротаційного методу визначення в'язкості [116, 117, 118] із урахуванням особливості даного матеріалу та умов його добування.

На основі закону Ньютона для рідинного тертя стосовно конструкції ротаційного приладу описаного у п. 3.2 (рис. 3.4, а) можна записати вираз для визначення дотичних напружень  $\tau$  на бічних поверхнях рухомого циліндра 3

$$\tau = \eta \cdot \left( \frac{du}{dy} + \frac{du_{\hat{a}}}{dy_{\hat{a}}} + \frac{du_i}{dy_i} \right), \quad (3.4)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості сапропелю, Па·с;

$du$ ,  $du_{\hat{a}}$ ,  $du_i$  – лінійна швидкість елементарного шару сапропелю відповідно у зазорі між бічною поверхнею рухомого циліндра, верхньою і нижньою його основами та зовнішнім циліндром, м/с;

$dy$ ,  $dy_{\hat{a}}$ ,  $dy_i$  – відстань за нормаллю між сусідніми елементарними шарами сапропелю відповідно у зазорі між бічною поверхнею рухомого циліндра, верхньою і нижньою його основами та зовнішнім циліндром, м.

Оскільки можна вважати, що швидкість шарів у зазорі між циліндрами змінюється за лінійним законом, то вираз (3.4) можна записати у вигляді:

$$\tau = \eta \cdot \left( \frac{u}{y} + \frac{u_{\hat{a}}}{y_{\hat{a}}} + \frac{u_i}{y_i} \right). \quad (3.5)$$

Прийнявши трикутний розподіл напружень за площею верхньої та нижньої основ рухомого циліндра та рівномірний розподіл по бічній його поверхні, величину крутного менту  $M_{\varepsilon\delta}$ , яку необхідно прикласти до вала рухомого циліндра, можна визначити за формулою

$$M_{\varepsilon\delta} = \tau \cdot \pi \cdot d_1 \cdot H \cdot \left( \frac{d_1}{2} \right) + 2 \cdot \tau \cdot \left( \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \right) \cdot \left( \frac{2}{3} \right) \cdot \left( \frac{d_1}{2} \right), \quad (3.5)$$

де  $d_1$  та  $H$  – відповідно зовнішній діаметр та висота внутрішнього циліндра, м.

Звідки

$$\tau = \frac{2 \cdot M_{\varepsilon\delta}}{\pi \cdot d_1^2 \cdot H \cdot \left( 1 + \frac{d_1}{3 \cdot H} \right)}. \quad (3.6)$$

Прийнявши трикутний розподіл швидкості за площею верхньої та нижньої основ рухомого циліндра та рівномірний розподіл по бічній його поверхні запишемо

$$u = \omega \cdot \frac{d_1}{2}, \quad (3.7)$$

$$u_{\hat{a}} = u_i = \omega \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{d_1}{2} = \omega \cdot \frac{d_1}{3}, \quad (3.8)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання вала внутрішнього циліндра,  $\text{с}^{-1}$ .

Із виразу (3.5) з урахуванням того, що  $y = (d_2 - d_1)/2$  (тут  $d_2$  – внутрішній діаметр зовнішнього циліндра, м) та виразів (3.6)-(3.8) отримаємо

$$\eta = \frac{2 \cdot M_{\varepsilon\delta}}{\pi \cdot d_1^2 \cdot H \cdot \left( 1 + \frac{d_1}{3 \cdot H} \right) \left( \frac{\omega \cdot d_1}{d_2 - d_1} + \frac{\omega \cdot d_1}{3} \cdot \left( \frac{1}{y_{\hat{a}}} + \frac{1}{y_i} \right) \right)}. \quad (3.9)$$

Оскільки, з іншої сторони

$$M_{\varepsilon\delta} = m \cdot g \cdot d_{\phi} / 2, \quad (3.10)$$

де  $m$  – маса вантажів під дією яких обертається внутрішній циліндр, кг;

$d_{\phi}$  – діаметр шківів приводу внутрішнього циліндра, м.



Врахувавши, що  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ , де  $n$  – частота обертання валу внутрішнього циліндра (об/с) та (3.10) із (3.9) отримаємо

$$\eta = \frac{m \cdot g \cdot d_{\phi}}{2 \cdot \pi^2 \cdot n \cdot d_1^3 \cdot H \cdot \left(1 + \frac{d_1}{3 \cdot H}\right) \left(\frac{1}{d_2 - d_1} + \frac{1}{3 \cdot y_a} + \frac{1}{3 \cdot y_i}\right)}. \quad (3.11)$$

Для розрахунку коефіцієнта динамічної в'язкості за формулою (3.11) проводили експериментальні дослідження на установці описаній у п. 3.2 (рис. 3.4) у такій послідовності.

Перед проведенням експерименту установку встановлювали горизонтально та шляхом вкладання вантажів досягали компенсації опору обертанню внутрішнього циліндра від підшипників та ущільнення.

Далі внутрішній простір приладу між рухомим та нерухомим циліндрами заповнювали досліджуванним зразком сапропелю. Заповнення здійснювали совочком, забезпечуючи утворення рівномірної цівки матеріалу. При цьому кромка совочка знаходилась на висоті 5-10 мм над верхнім отвором зовнішнього циліндра. Для знімання надлишків матеріалу та вирівнювання його вільної поверхні застосовували ніж-планувальник. Герметизацію зовнішнього циліндра проводили шляхом встановлення кришки та загвинчуванням болтів.

Після цього звільняли привідний шків 6 установки від фіксатора та поступово збільшували масу вантажу 8 до тих пір поки не починався його вертикальний рух. При цьому кожна ступінь вантажу витримувалась протягом 3 с. Частота обертання вала рухомого циліндрі 3 визначалась за показами вимірювального приладу 12.

Далі, обертаючи привідний шків 6, повертали рухомий циліндр 3 у вихідне положення та фіксували. Тоді збільшували масу вантажів на 0,3 кг і звільняли шків 6 від фіксатора та визначали частоту обертання вала рухомого циліндра 3. Експеримент повторювали ще тричі збільшуючи щоразу масу вантажу на 0,3 кг. Для реалізації повторюваностей експерименту внутрішній простір приладу між рухомим та нерухомим циліндрами звільняли від

сапропелю, промивали та висушували із наступним заповненням свіжим зразком матеріалу.

Для дослідження впливу тиску верхніх шарів сапропелю за товщиною покладів на його в'язкість реалізовували експеримент за описаною вище методикою лише з тією різницею, що після герметизації зовнішнього циліндра 2 вмикалась подача стисненого повітря та створювався надлишковий тиск на досліджуваний зразок матеріалу. Величина тиску за яких здійснювались дослідження складала 50, 100, 150 та 200 кПа, що визначалась глибиною залягання покладів 5, 10, 15 та 20 м відповідно.

Використовуючи отримані у результаті експериментів значення частоти обертання вала рухомого циліндра 3 та сумарної маси вантажу 8, що їй відповідає, за формулою (3.11) розраховували значення динамічної в'язкості сапропелю для конкретних умов експерименту.

### **3.8. Методика дослідження траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості**

Важливими конструктивними параметрами пропонованого пневматичного забірної пристрою є кут нахилу твірної конічного корпусу та його висота. Для визначення раціональних меж цих параметрів у п. 2.4 проведені теоретичні обґрунтування траєкторії руху бульбашки повітря у середовищі в'язкої рідини. Оскільки безпосередньо перевірити достовірність отриманих графічних залежностей для сапропелю доступними способами візуалізації є неможливим, то вирішено було провести дослідження для в'язких рідин із прозорістю достатньою для візуального спостереження.

Дослідження траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості проводили з використанням установки описаної в п. 3.2. (рис.3.5).

У якості досліджуваних рідин було вибрано воду (коефіцієнт динамічної в'язкості при 20<sup>0</sup>С  $\eta = 0,001004 \text{ І } \dot{\text{а}} \cdot \ddot{\text{н}}$ ), масло індустріальне SAE 40 (коефіцієнт динамічної в'язкості при 20<sup>0</sup>С  $\eta = 0,0275 \text{ І } \dot{\text{а}} \cdot \ddot{\text{н}}$ ) та концентрований миючий

засіб (ТУ У 24.5 23731918-010-2003), в'язкість якого також визначалась за методикою описаною у п. 3.6.

Перед дослідженням, відрізок повітропроводу із соплом, діаметром визначеним планом експерименту за нульового значення кута його нахилу до горизонту, закріплювали у ковзній муфті. Тоді даний елемент разом із манометром та шлангом подачі стисненого повітря монтувався у ємкості установки. Далі зібрану установку встановлювали на горизонтальну поверхню, а нульову поділку шкали відліку кута нахилу вихідного сопла суміщали із горизонтальною віссю шкали нанесеної на передній стінці приладу. Для встановлення необхідного діапазону тиску повітря у вихідному соплі здійснювали спочатку грубе його регулювання за допомогою вентиля установки, із такого розрахунку, щоб золотниковий механізм компресора забезпечував регулювання тиску у межах від 100 до 500 кПа.

Заповнення ємкості установки досліджуваною рідиною здійснювалось струменем середнього діаметру з метою недопущення порушення попередніх регулювань. Заповнення припинялось після досягнення рідиною рівня нижчого на 20-30 мм від верхнього краю ємкості.

Далі встановлювали на штативі цифрову фотокамеру NIKON COOLPIX L22 таким чином, щоб об'єктив камери знаходився на рівні вихідного сопла повітропроводу, а площина передньої панелі камери була паралельна площині передньої стінки ємкості установки. Встановлювали режим роботи камери – знімання відео.

Тоді вмикали подачу стисненого повітря, виставляли відповідний плану експерименту тиск та натискали кнопку „пуск” відеокамери. Записували відеоролик тривалістю 6 с. Далі змінювали тиск подачі повітря та знову записували ролик зазначеної тривалості. Потім зливали рідину, встановлювали кут нахилу сопла –  $45^{\circ}$ , та повторювали експеримент за описаною вище послідовністю.

Записані у процесі реалізації експерименту ролики обробляли з метою отримання кривих, які обмежують простір в якому рухається повітряний потік

після його виходу із сопла. Для цього за допомогою Media Window програми ACDSce перетворювали неперервний відео ролик у дискретні зображення, що відповідали кадрам ролику. Оскільки якість відеозапису характеризувалась 30 кадрами в секунду, то із шести секундного ролик отримували 180 цифрових дискретних зображень. Далі вибирали кожне тридцяте зображення, яке відповідає закінченню кожної секунди експерименту, і таким чином отримували 6 відібраних зображень, що забезпечувало шестикратну повторюваність експерименту.

Вибрані в описаний вище спосіб зображення експортувались у програму Microsoft Excel. Далі на нього накладалась координатна сітка та два точкових графіки даної програми, які у першому наближенні відповідали кривим, що обмежують простір у якому рухається повітряний потік після його виходу із сопла. Тоді добивались співпадання відповідних поділок осей графіка та координатної сітки передньої стінки установки шляхом масштабування відповідних зображень (рис. 3.8).

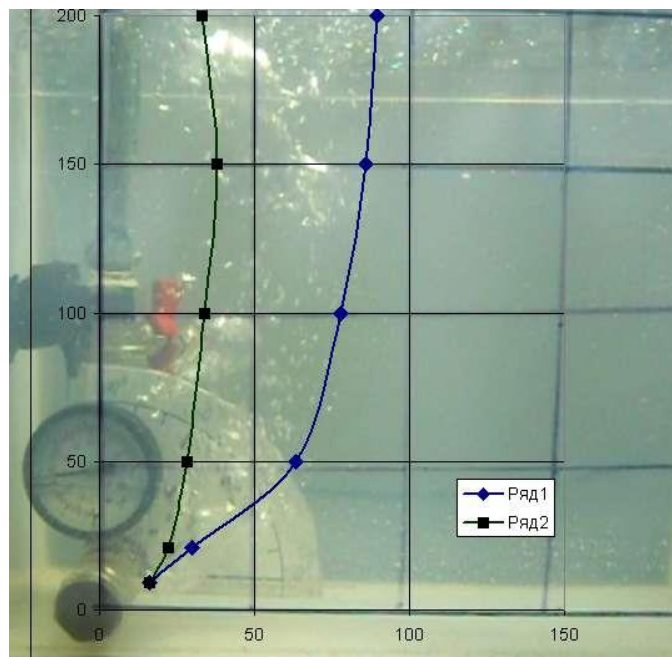


Рис. 3.8. Зразок опрацьованого фотографічного зображення руху повітряного потоку в рідині (воді)

Після цього, шляхом переміщення точок попередніх графіків, уточнювали їхню форму із формою реального повітряного потоку. При цьому, координати точок відображались у електронній таблиці програми.

### **3.9. Методика дослідження продуктивності забірною пристрою для добування сапропелю і структури потоку двокомпонентного середовища у висхідній течії корпусу та піднімального трубопроводу**

Аналіз літературних джерел та попередні дослідження дозволили встановити, що визначальний вплив на продуктивність роботи розглядуваного забірною пристрою для добування сапропелю мають товщина шару сапропелю  $h$  з під якого ведеться добування, тиск нагнітання повітря  $P$ , та довжина піднімального трубопроводу  $l$ .

Таким чином, проводили трифакторний експеримент із зміною факторів на рівнях, які наведені у Додатку Б таблиця Б.1. Під час даних досліджень використовувалась експериментальна установка описана у п. 3.2 (рис.3.6).

У процесі реалізація експерименту ємкість установки заповнювали сапропелем вологістю 92–94% за висоти його шару відповідно до плану експерименту. Величину робочого тиску подачі повітря, визначену планом експерименту, встановлювали регулювальним золотником компресора та контролювали за манометром. Для зміни довжини піднімального трубопроводу використовували швидкознімні відрізки труб довжиною 0,5 м.

Далі, вмикаючи подачу повітря, приводили в дію забірний пристрій. Через прозору стінку даної установки велись візуальні спостереження за рухом матеріалу. На основі цих спостережень оцінювалась структура висхідної течії двокомпонентного потоку.

Для скорочення кількості дослідів та отримання закономірності впливу досліджуваних факторів у вигляді рівняння регресії було застосовано математичний метод планування експерименту та здійснено експеримент за симетричним некомпозіційним планом Бокса-Бенкіна другого порядку [51] (Додаток Б таблиця Б.2).

Планування і проведення експерименту включало наступні етапи: кодування факторів; складання плану-матриці експерименту; рандомізація дослідів; реалізація плану експерименту; перевірка відтворюваності дослідів;

розрахунок значень коефіцієнтів регресії; оцінка значущості коефіцієнтів регресії; перевірка адекватності моделі.

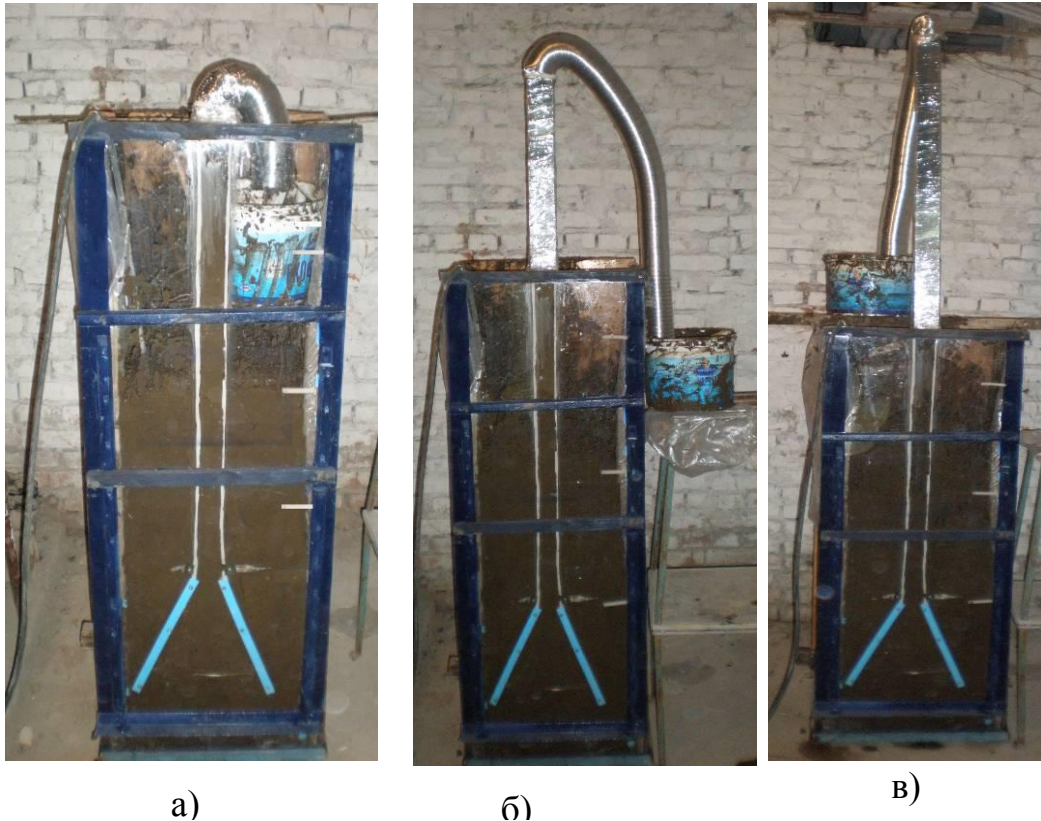


Рис 3.9. Фото реалізації експерименту за товщини шару сапропелю  $h=1$  м та довжини піднімального трубопроводу: а –  $l=1$  м; б –  $l=1,5$  м; в –  $l=2$  м

Кодування факторів здійснювали для переведення їх у безрозмірні величини. Зв'язок між кодованими і натуральними величинами факторів встановлювався залежностями:

$$x_1 = \frac{P - P_0}{\varepsilon_1}, \quad x_2 = \frac{l - l_0}{\varepsilon_2}, \quad x_3 = \frac{h - h_0}{\varepsilon_3}, \quad (3.12)$$

де  $P_0$ ,  $h_0$ ,  $l_0$  – значення факторів на основному рівні, відповідно тиск за якого нагнітається повітря, товщина шару сапропелю, довжина піднімального трубопроводу;

$\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  – інтервали варіювання фактора.

Для трифакторного дослідження повне квадратне рівняння має вид:

$$\begin{aligned} \bar{y} = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + \\ & + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Коефіцієнти регресії визначають за наступними формулами [47, 51]:

$$b_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}, \quad (3.14)$$

$$b_j = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^n x_{ji} y_i, \quad (3.15)$$

$$b_{jr} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n x_{ji} x_{ri} y_i, \quad (3.16)$$

$$b_{jj} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n x_{ji}^2 y_i - \frac{1}{16} \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n x_{ji}^2 y_i + \frac{1}{2n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}, \quad (3.17)$$

де  $u$  – номер дослідів в центрі плану;

$n_0$  – кількість дослідів в центрі плану;

$r, j$  – номери фактору дослідів, причому у формулі (3.16)  $r \neq j$ ;

$p$  – кількість факторів;

$i$  – номер дослідів;

$n$  – кількість дослідів;

$y_i$  – значення функції відгуку в  $i$ -му досліді;

$x_{ji}, x_{ri}$  – кодовані значення  $j$ -го чи  $r$ -го фактору в  $i$ -му досліді;

$y_{0u}$  – значення функції відгуку в  $u$ -му досліді в центрі плану.

Оскільки експерименти проводились із однаковим числом повторностей, то однорідність ряду дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена [51]. Для цього визначали розрахункову величину даного критерію:

$$G^{\text{дi cд.}} = \frac{S_{y_i \max}^2}{\sum_{i=1}^n S_{y_i}^2}, \quad (3.18)$$

де  $S_{y_i \max}^2$  – найбільша із дисперсій.

$S_{y_i}^2$  – дисперсія, що характеризує розсіювання результатів в  $i$ -му досліді.

$$S_{y_i}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{g=1}^m (y_{ig} - \bar{y}_i)^2, \quad (3.19)$$

де  $m$  – число повторностей в досліді;

$g$  – номер повторності;

$y_{ig}$  – результат  $g$ -ї повторності  $i$ -го дослідю;

$\bar{y}_i$  – середнє арифметичне значення усіх повторностей  $i$ -го дослідю.

Ряд дисперсій рахували однорідним, якщо:

$$G^{\text{дi cд.}} < G^{\text{дi cд.}}(0,05; n; f), \quad (3.20)$$

де  $G^{\text{дi cд.}}(0,05; n; f)$  – табличне значення критерію Кохрена за 5%-го рівня значущості,  $n$  – кількість дослідів та  $f = m - 1$  – числа ступенів вільності.

Дисперсію відтворюваності експерименту визначали за результатами дослідів в центрі плану по формулі:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{f_1}, \quad (3.21)$$

де  $\bar{y}_0$  – середнє арифметичне значення функції відгуку отримане за результатами  $n_0$  дослідів в центрі плану;

$f_1 = n_0 - 1$  – число ступенів вільності дисперсії відтворюваності.

Дисперсії коефіцієнтів регресії та їх коваріації визначали за формулами:

$$S_{b_0}^2 = \frac{1}{n_0} S_y^2; \quad (3.22)$$

$$S_{b_j}^2 = 0,125 S_y^2; \quad (3.23)$$

$$S_{b_{jr}}^2 = 0,25 S_y^2; \quad (3.24)$$

$$S_{b_{jj}}^2 = 0,27083 S_y^2; \quad (3.25)$$

$$\text{cov}_{b_0 b_{jj}} = -0,16667 S_y^2; \quad (3.26)$$

$$\text{cov}_{b_{jj} b_{rr}} = 0,02083 S_y^2. \quad (3.27)$$

Довірчі інтервали коефіцієнтів регресії знаходили використовуючи табличне значення критерію Ст'юдента  $t(0,05; f)$  за 5%-го рівня значущості та  $f_1 = n_0 - 1$  – числа ступенів вільності в центрі плану:



$$\Delta b_0 = t(0,05;f)S_{b_0}; \quad (3.28)$$

$$\Delta b_j = t(0,05;f)S_{b_j}; \quad (3.29)$$

$$\Delta b_{j_r} = t(0,05;f)S_{b_{j_r}}; \quad (3.30)$$

$$\Delta b_{j_j} = t(0,05;f)S_{b_{j_j}}. \quad (3.31)$$

Якщо коефіцієнт регресії виявлявся меншим довірчого інтервалу, то його вважали статично незначущим. Проте видаляли із моделі лише ті коефіцієнти, які не корелювали ні з яким іншим. Оскільки, у протилежному випадку, рівняння регресії може виявитись неадекватним.

Гіпотезу адекватності отриманої моделі перевіряли за допомогою  $F$ -критерію (критерію Фішера). Його розрахункове значення визначали за формулою:

$$F^{\delta i \zeta \delta} = \frac{S_{i \hat{a} \hat{a} \hat{a}}^2}{S_y^2}. \quad (3.32)$$

Дисперсія неадекватності  $S_{i \hat{a} \hat{a} \hat{a}}^2$  становить:

$$S_{i \hat{a} \hat{a} \hat{a}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}{f_2}, \quad (3.33)$$

де  $y_i, \bar{y}_i$  – значення функції відгуку  $i$ -го дослідження, визначене відповідно експериментально та за рівнянням регресії;

$f_2 = n - k'$  – число ступенів вільності дисперсії неадекватності з врахуванням числа  $k'$  залишених коефіцієнтів регресії (у тому числі і  $b_0$ ).

Гіпотезу про адекватність рівняння приймали у тому випадку, коли розраховане значення  $F$ -критерію не перевищувало табличне:

$$F^{\delta i \zeta \delta} \leq F^{\delta \hat{a} \hat{a} \hat{a}}(0,05; f_2 f_1), \quad (3.34)$$

де  $F^{\delta \hat{a} \hat{a} \hat{a}}(0,05; f_2 f_1)$  – табличне значення критерію Фішера за 5%-го рівня значущості і ступенів вільності дисперсії неадекватності  $f_2$  та дисперсії відтворюваності  $f_1$ .

Розроблена методика дослідження продуктивності засобу із пневматичним забірним пристроєм, заснована на використанні плану реалізації експерименту Бокса-Бенкіна другого порядку, дозволяє отримати математичну модель процесу його роботи у вигляді рівняння регресії. Функцією відгуку отриманого рівняння є продуктивність засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм.

У всіх випадках проведення експериментальних досліджень п. 3.4. – п. 3.9. повторність дослідів становила 3...6 разів. Обробку результатів проводили за схемою наведеною у джерелах [9, 22, 106].

### **3.10. Висновки до розділу 3**

1. Розроблено програму і методики експериментальних лабораторно-виробничих досліджень; приведено опис та загальні види обладнання, приладів для проведення досліджень; розроблено методику проведення повнофакторного експерименту із встановлення продуктивності лабораторної установки забірною пристроєм засобу для добування сапропелю.

2. При проведенні лабораторних досліджень використовувалось стандартне обладнання і методики для досліджень вологості, зольності, об'ємної маси сапропелів. Для досліджень в'язкості сапропелів і траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості використовували власно розроблене обладнання.

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1. Результати визначення природної вологості сапропелів

Одним із важливих показників, що впливає на ряд інших характеристик сапропелю, а отже і на процес добування, є його вологість. Характерною особливістю сапропелевих покладів є надзвичайно високе насичення водою, що перевищує максимальну їх вологоємність.

Експерименти проводили з використанням обладнання, фото якого подано на рис. 3.3, а, в, г, д згідно з методикою описаною у п. 3.4. Під час дослідження використовувались проби сапропелю відібрані із шару покладів за допомогою сапропелерозвідувального бура (рис. 3.1; 3.2) та сформовані відповідно до методики описаної у п. 3.3. Таки чином було визначено вологість покладів сапропелю на глибині залягання 1-10 м з інтервалом в один метр.

Значення експериментально отриманих вологостей сапропелю наведено у табл. 4.1, за якими побудована графічна залежність зміни досліджуваного показника від глибини залягання покладів (рис. 4.1.).

Таблиця 4.1.

Середні значення вологості сапропелю о. Зяцьке за глибиною залягання

Глибина залягання, $h$ м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Середнє значення вологості, $W$ %	97,4	95,6	92,4	90,4	89,0	88,6	87,4	86,8	86,2	84,8

Як видно з (рис. 4.1), вологість органічного сапропелю значною мірою залежить від глибини залягання. Лінійна апроксимація експериментальних даних дозволяє отримати наступну залежність

$$W = -1,313 \cdot h + 97,080. \quad (4.1)$$

Із залежності (4.1) можна зробити висновок, що вологість сапропелів о. Зяцьке знижується приблизно на 1,3% із кожним метром збільшення глибини залягання.

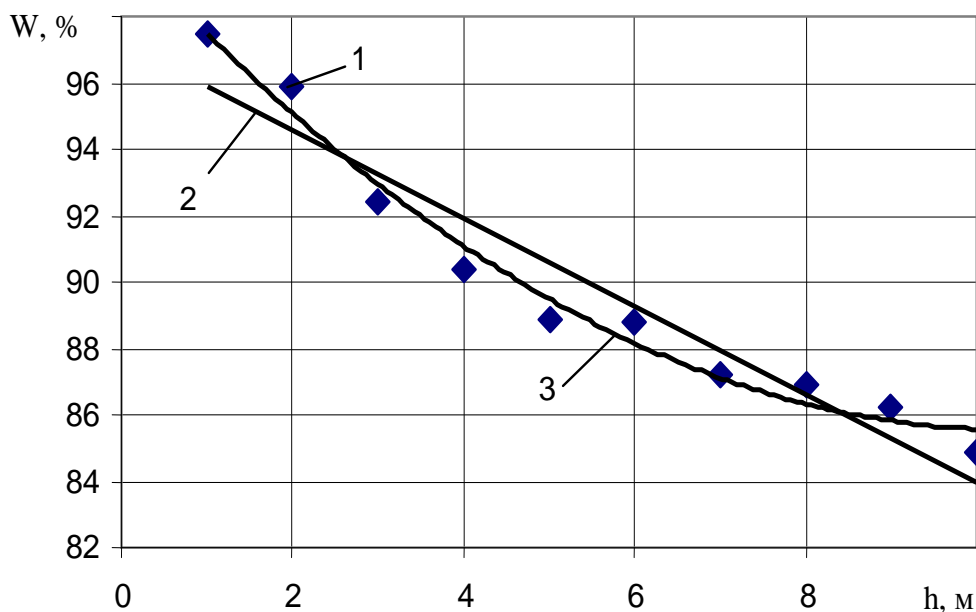


Рис. 4.1. Залежність вологості органічного сапропелю  $W$  о. Зяцьке від глибини залягання  $h$ : 1 – експериментальні точки; 2 – лінійна апроксимація; 3 – апроксимація поліномом другого порядку

Також слід відмітити, що лінійну залежність між вологістю та глибиною залягання можна використовувати лише для наближених розрахунків. Оскільки значно точніше експериментальні дані апроксимує залежність у вигляді полінома другого порядку

$$W = 0,1280 \cdot h^2 - 2,7211 \cdot h + 99,8970. \quad (4.2)$$

Звідки можна зробити висновок, що у діапазоні глибин залягання покладів 1...4 м даного озера швидкість зменшення вологості із зростанням глибини залягання знаходиться у межах 2,0...2,5%/м, а у подальшому відбувається зниження даного показника.

## 4.2. Результати визначення зольності сапропелю

Для якісної оцінки покладів сапропелів о. Зяцьке з точки зору їх використання для приготування органічних добрив, а також для глибшого розкриття взаємного впливу фізичних властивостей було проведено дослідження зольності сапропелю.

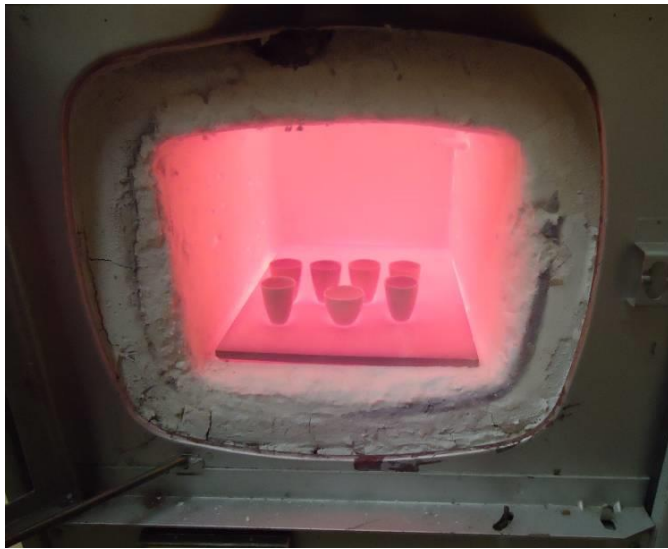


Рис. 4.2. Фото процесу прожарювання проб сапропелю

Експерименти проводили з використанням обладнання, фото якого подано на рис. 3.3, б, в, г, е згідно з методикою описаною у п. 3.5. Під час дослідження використовувались проби сапропелю відібрані із шару покладів за допомогою сапропелерозвідувального бура (рис. 3.1, 3.2), сформовані відповідно до методики описаної у п. 3.3 та висушені до рівноважної вологості. Таким чином, було визначено зольність покладів сапропелю на глибині залягання 1...10 м з інтервалом в один метр.

Середні значення експериментально отриманих зольностей сапропелю наведено у табл. 4.2, за якими побудована графічна залежність зміни досліджуваного показника відповідно до глибини залягання покладів (рис. 4.3.).

Таблиця 4.2.

Середні значення зольності сапропелю о. Зяцьке за глибиною залягання

Глибина залягання, $h$ м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Середнє значення зольності, $A^c$ %	20,33	22,68	23,81	26,66	27,66	28,57	30,61	31,75	32,25	32,79

З (рис. 4.3) видно, що зольність досліджуваного родовища сапропелю зростає із збільшенням глибини їх залягання. Лінійна апроксимація експериментальних даних дозволяє отримати наступну залежність

$$\hat{A}^n = 1,4046 \cdot h + 19,9910. \quad (4.3)$$

Таким чином, зольність сапропелю о. Зяцьке зростає приблизно на 1,4 % із кожним метром збільшення глибини залягання.

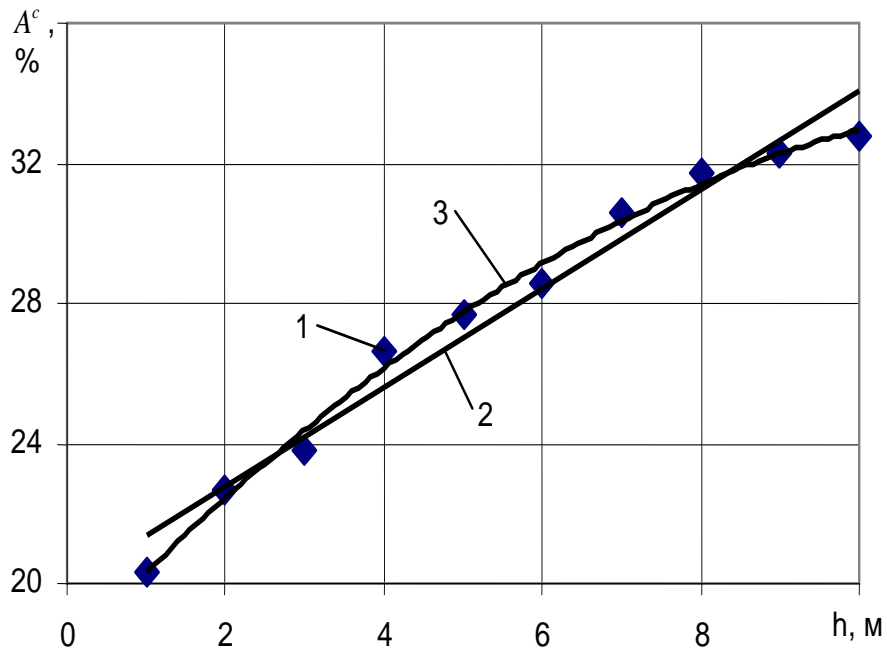


Рис. 4.3. Залежність зольності органічного сапропелю  $A^c$  о. Зяцьке від глибини залягання  $h$ : 1 – експериментальні точки; 2 – лінійна апроксимація; 3 – апроксимація поліномом другого порядку

Також слід відмітити, що у даному випадку лінійна апроксимація забезпечує задовільну точність, оскільки значення коефіцієнта що визначає вплив на зольність глибини залягання покладів у другому степені в апроксимаційному поліномі відповідного порядку є не значущим

$$\hat{A}^{\bar{n}} = -0,0898 \cdot h^2 + 2,3915 \cdot h + 18,0150. \quad (4.4)$$

Отриманий діапазон зміни зольності покладів  $\hat{A}^{\bar{n}} = 20...33\%$  дозволяє віднести їх саме до органічного типу та вказує на особливу їх цінність для сільськогосподарського виробництва.

Низька зольність досліджуваних покладів зумовлена особливістю їх утворення, тобто умовами, в яких проходить процес відмирання рослинного та тваринного світу. Результати досліджень збігаються із твердженнями А.Я. Рубінштейна [83], згідно з якими в малих водоймах через нестачу кисню відбувається неповний розклад органічної речовини, що відкладається на дні водойми із відмерлих організмів та рослин, тому утворюються саме малозольні поклади.

### 4.3. Результати визначення об'ємної маси сапропелю

Об'ємна маса сапропелю є визначальною характеристикою при встановленні продуктивності засобів для його добування. Тому було проведено дослідження даного показника за методикою описаною у п. 3.6.

Під час дослідження використовувались проби сапропелю відібрані із шару покладів за методикою описаною у п. 3.3. Для зменшення похибки отриманих результатів, досліди проводили із чотирьохкратною повторністю.

Середні значення об'ємної маси сапропелю о. Зяцьке наведено у табл. 4.3, за якими побудована графічна залежність зміни досліджуваного показника відповідно до глибини залягання покладів (рис. 4.4.).

Таблиця 4.3.

Середні значення об'ємної маси сапропелю о. Зяцьке за глибиною залягання

Глибина залягання, $h$ м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Середні значення об'ємної маси, $\gamma$ %	1010,52	1045,38	1065,33	1114,89	1150,29	1178,54	1194,22	1228,08	1256,78	1284,33

Таким чином, як і для вологості та зольності сапропелю присутня чітка залежність об'ємної маси із глибиною залягання покладів. Але на відміну від вологості даний показник з достатньою точністю апроксимується лінійною залежністю

$$\gamma = 30,449 \cdot h + 985,370. \quad (4.5)$$

Отже об'ємна маса сапропелю о. Зяцьке коливається у межах  $\gamma = 1010 \dots 1285$  кг/м<sup>3</sup>, при цьому із кожним метром збільшення глибини залягання даний показник зростає приблизно на 30,5 кг/м<sup>3</sup>.

Оскільки, як уже зазначалось раніше, особливу цінність для сільськогосподарського виробництва складає органічна речовина сапропелю, то встановимо, як змінюється вміст у покладах абсолютно сухої органічної речовини за формулою:

$$k(h) = \gamma(h) \cdot \left(1 - \frac{W(h)}{100}\right) \left(1 - \frac{A^c(h)}{100}\right). \quad (4.6)$$

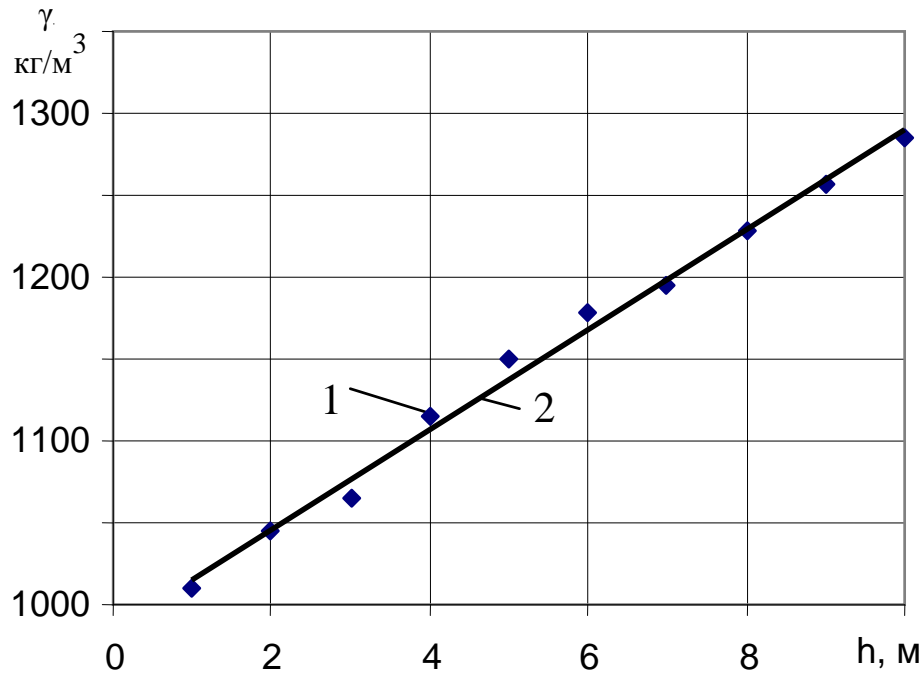


Рис. 4.4. Залежність об'ємної маси  $\gamma$  сапропелю о. Зяцьке від глибини залягання  $h$ : 1 – експериментальні точки; 2 – лінійна апроксимація

А після підстановки у (4.6) виразів (4.2), (4.3) і (4.5) отримаємо:

$$k(h) = (30,45 \cdot h + 985,37) \cdot \left(1 - \frac{0,128 \cdot h^2 - 2,721 \cdot h + 99,897}{100}\right) \times \left(1 - \frac{1,404 \cdot h + 19,991}{100}\right), \quad (4.8)$$

Для аналізу отриманої залежності побудований графік зміни вмісту абсолютно сухої органічної речовини із глибиною залягання покладів (рис.4.5).

Таким чином дослідження фізичних властивостей сапропелю о. Зяцьке підтвердили їх належність до органічного типу, виявили чіткий вплив глибини залягання на досліджувані показники, а також вказують, що найбільш цінні поклади за вмістом органічної речовини знаходяться на глибині понад 4 м. Тому для досягнення максимального ефекту від добутих покладів слід починати їх розробку із шарів які знаходяться у межах глибин 4...5 м.



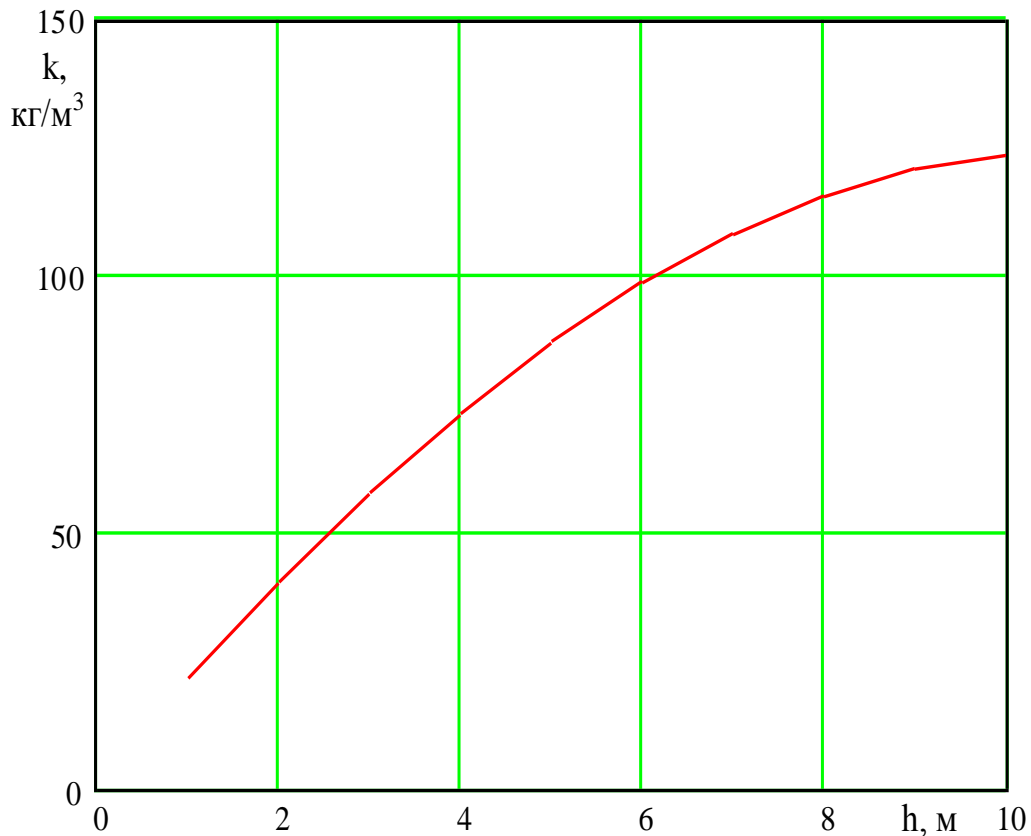


Рис. 4.5. Залежності вмісту абсолютно сухої органічної речовини  $k$  із глибиною залягання покладів  $h$

#### 4.4. Результати дослідження в'язкості органічного сапропелю

З метою практичного використання математичних моделей отриманих у п. 2.4 – 2.5 було проведено дослідження в'язкості сапропелів органічного типу середнього шару залягання у водоймищі. А також встановлено закономірності впливу на даний показник гідростатичного тиску верхніх шарів покладів озера та води, та швидкості зсуву.

Дослідження проводили на лабораторній установці, схема та фото якої подано на рис. 3.4 згідно з методикою описаною у п. 3.6. Під час дослідження використовувались зразки сапропелю відібрані із о. Зяцьке і сформовані у три проби із вологостями  $W_1 = 95 \pm 1\%$ ,  $W_2 = 90 \pm 1\%$ ,  $W_3 = 85 \pm 1\%$

Середні значення коефіцієнта динамічної в'язкості сапропелю о. Зяцьке за різних швидкостей зсуву шарів та гідростатичних тисків наведені у

табл. 4.4-4.6 Для аналізу впливу на коефіцієнт динамічної в'язкості швидкості зсуву шарів побудовані відповідні графічні залежності (рис. 4.6-4.7).

Таблиця 4.4.

Середні значення коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  сапропелю о. Зяцьке вологості  $W_1 = 95 \pm 1\%$  та відповідній їм швидкості зсуву шарів  $u$

Тиск, кПа									
0		50		100		150		200	
$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с
0,0068	11,975	0,00998	13,28	0,0066	23,66	0,0094	19,956	0,005	40,135
0,0091	11,516	0,01932	8,353	0,00822	22,908	0,016	12,409	0,00633	34,048
0,020	8,232	0,03156	5,525	0,01145	17,62	0,025	8,673	0,00922	27,008
0,050	6,438	0,05825	3,233	0,0235	9,155	0,059	3,868	0,02644	9,156
0,059	3,748	0,09135	2,208	0,0406	5,632	0,144	1,687	0,06699	3,815
0,063	3,427	0,11889	1,810	0,07729	3,132	0,223	1,144	0,2364	1,138
0,112	2,048	0,28243	0,810	0,16746	1,526	0,253	1,068	0,30917	0,914
0,167	1,446	0,33493	0,723	0,24963	1,047	0,311	0,908	0,3654	0,810
0,252	1,017	0,36266	0,705	0,3349	0,843	0,377	0,786	0,4156	0,886
0,335	0,958	0,46022	0,696	0,3597	0,822	0,477	0,722	0,458	0,683
0,502	0,562	0,502	0,562	0,4713	0,781	0,492	0,642	0,502	0,669
-	-	-	-	0,502	0,642	0,502	0,601	-	-

Таблиця 4.5.

Середні значення коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  сапропелю о. Зяцьке вологості  $W_2 = 90 \pm 1\%$  та відповідні їм швидкості зсуву шарів  $u$

Тиск, кПа									
0		50		100		150		200	
$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с
0,0083	89,071	0,0076	100,719	0,007	111,421	0,0077	123,423	0,011	135,516
0,011	69,339	0,0082	94,703	0,013	61,60	0,012	67,459	0,018	45,643
0,015	52,617	0,025	32,379	0,023	34,534	0,021	39,192	0,031	26,984
0,022	35,324	0,040	20,077	0,050	16,33	0,042	19,918	0,053	16,278
0,039	20,138	0,050	16,33	0,072	11,56	0,091	9,276	0,077	11,31
0,072	11,244	0,084	9,959	0,10	8,433	0,112	7,711	0,10	8,834
0,112	7,349	0,091	9,276	0,114	5,996	0,144	6,609	0,110	8,072
0,114	5,803	0,112	7,711	0,167	5,221	0,167	5,301	0,144	6,371
0,167	6,024	0,167	5,221	0,201	4,417	0,224	4,015	0,160	5,542
0,189	4,544	0,201	4,417	0,224	4,025	0,229	3,991	0,201	4,685
0,201	4,350	0,335	2,690	0,236	3,873	0,251	3,312	0,335	3,102
0,335	2,650	0,405	1,645	0,251	3,694	0,335	2,811	0,451	2,891
0,502	1,794	0,496	1,841	0,335	2,811	0,482	2,165	0,492	2,185
-	-	0,502	1,847	0,502	0,531	0,502	1,972	0,502	1,981

Таблиця 4.6.

Середні значення коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  сапропелю о. Зяцьке вологості  $W_3 = 85 \pm 1\%$  та відповідні їм швидкості зсуву шарів  $u$

Тиск, кПа									
0		50		100		150		200	
$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с	$u$ , м/с	$\eta$ , Па·с
0,0056	329,48	0,0067	285,06	0,0061	373,23	0,0059	409,57	0,0071	419,4
0,0065	228,01	0,0077	252,53	0,0074	317,66	0,0074	332,47	0,0083	307,7
0,01	187,39	0,0088	222,76	0,0094	252,02	0,0091	279,21	0,0099	259,5
0,021	91,24	0,0094	211,98	0,016	152,29	0,012	215,89	0,017	157,4
0,033	57,48	0,01	198,78	0,017	142,41	0,022	120,46	0,03	90,1
0,042	46,92	0,015	133,98	0,02	124,24	0,035	79,21	0,037	75,2
0,046	43,58	0,019	110,67	0,023	108,36	0,048	58,46	0,046	62,4
0,077	26,11	0,022	95,15	0,048	52,27	0,063	45,41	0,053	54,5
0,112	18,31	0,025	87,81	0,084	30,2	0,072	40,47	0,059	50,4
0,167	12,37	0,033	65,07	0,10	25,43	0,10	29,44	0,077	38,9
0,251	8,35	0,072	33,73	0,141	20,47	0,144	21,04	0,091	33,2
0,335	5,18	0,112	19,98	0,144	18,22	0,167	18,13	0,1	31,1
0,412	6,43	0,167	13,51	0,167	13,58	0,201	15,52	0,144	22,2
0,502	4,41	0,201	11,38	0,201	12,98	0,251	12,64	0,201	16,1
		0,251	9,63	0,251	10,17	0,335	10,17	0,335	10,1
		0,502	4,07	0,509	5,09	0,502	5,09	0,502	6,96

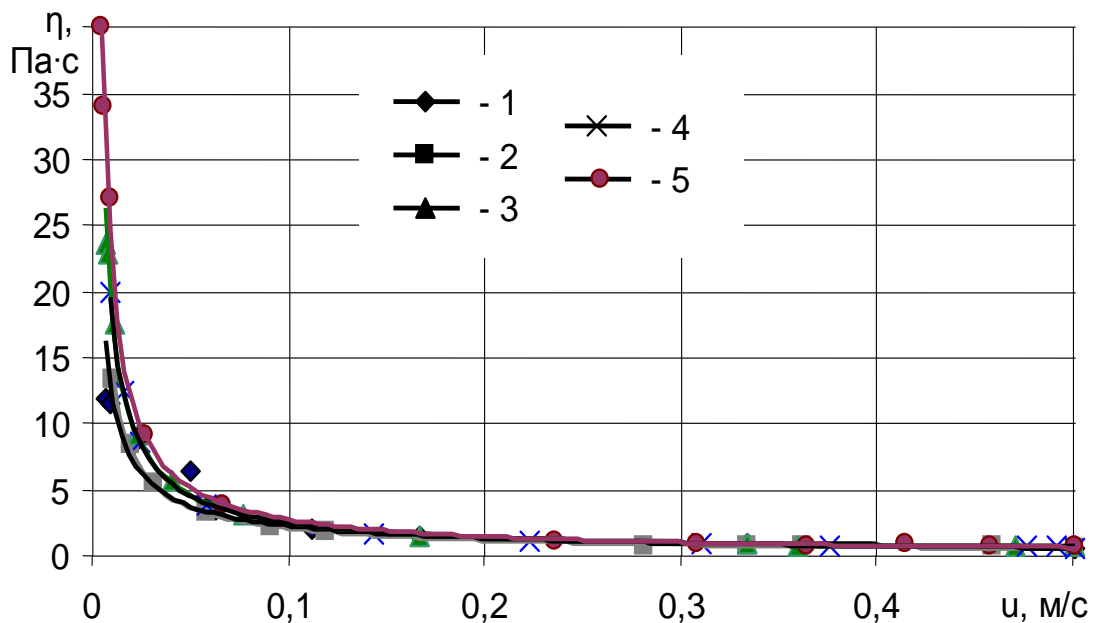


Рис. 4.6. Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  сапропелю вологості  $W_l = 95 \pm 1\%$  від швидкості шарів  $u$  за гідростатичного тиску:  
 1 –  $P = 0$  кПа; 2 –  $P = 50$  кПа; 3 –  $P = 100$  кПа; 4 –  $P = 150$  кПа;  
 5 –  $P = 200$  кПа

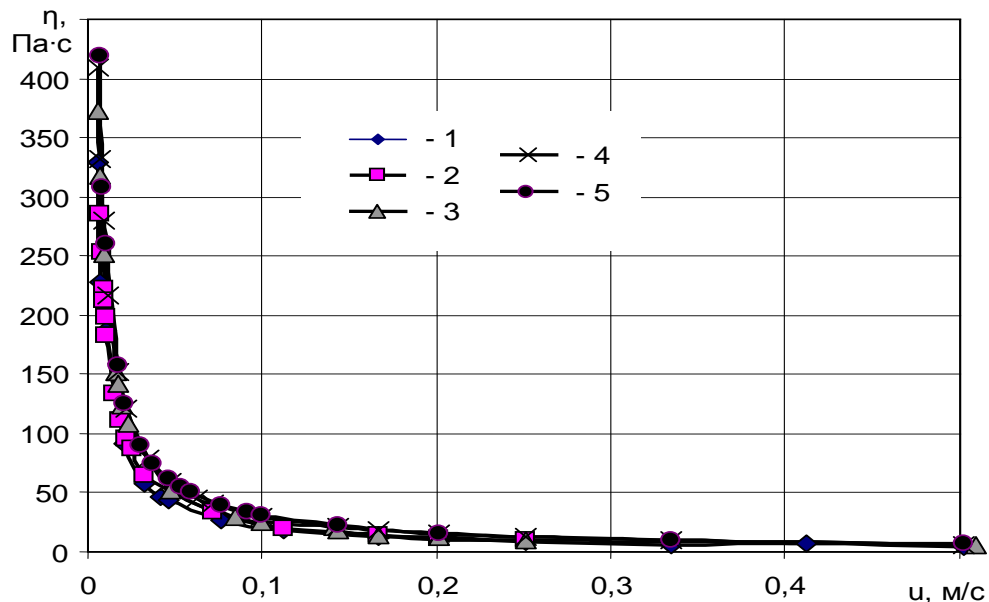


Рис. 4.7. Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  сапропелю вологості  $W_3 = 85 \pm 1\%$  від швидкості шарів  $u$  за гідростатичного тиску: 1 –  $P=0$  кПа; 2 –  $P=50$  кПа; 3 –  $P=100$  кПа; 4 –  $P=150$  кПа; 5 –  $P=200$  кПа

Із отриманих результатів та побудованих графічних залежностей видно, що в'язкість сапропелю зменшується із зростанням швидкості деформацій зсуву між шарами. Особливо значним цей вплив є за зміни швидкостей у діапазоні 0,005...0,2 м/с. Також у даному діапазоні швидкостей виявляється і вплив гідростатичного тиску на зростання в'язкості сапропелю. Очевидно, що таке явище спричинене неомогенною структурою покладів та наявністю волокнистих включень, а отже і наявністю сил зчеплення між ними.

Подальше зростання швидкості відносного руху шарів знижує вплив даного фактору на зменшення в'язкості сапропелю. Результати експериментальних досліджень показують, що за швидкості  $u > 0,05$  м/с вплив гідростатичного тиску на зміну в'язкості сапропелю не виходить за межі довірчого інтервалу значень, а апроксимація експериментальних значень степеневою функцією у даному діапазоні швидкості забезпечує високу точність (рис. 4.8).

Результати даних експериментальних досліджень дозволяють констатувати значний вплив на зростання в'язкості сапропелю – зниження його вологості, і особливо це стосується швидкостей відносного руху шарів  $u < 0,2$  м/с. Різке

зростання в'язкості спостерігається для сапропелю вологістю  $W_3 = 85 \pm 1\%$ .

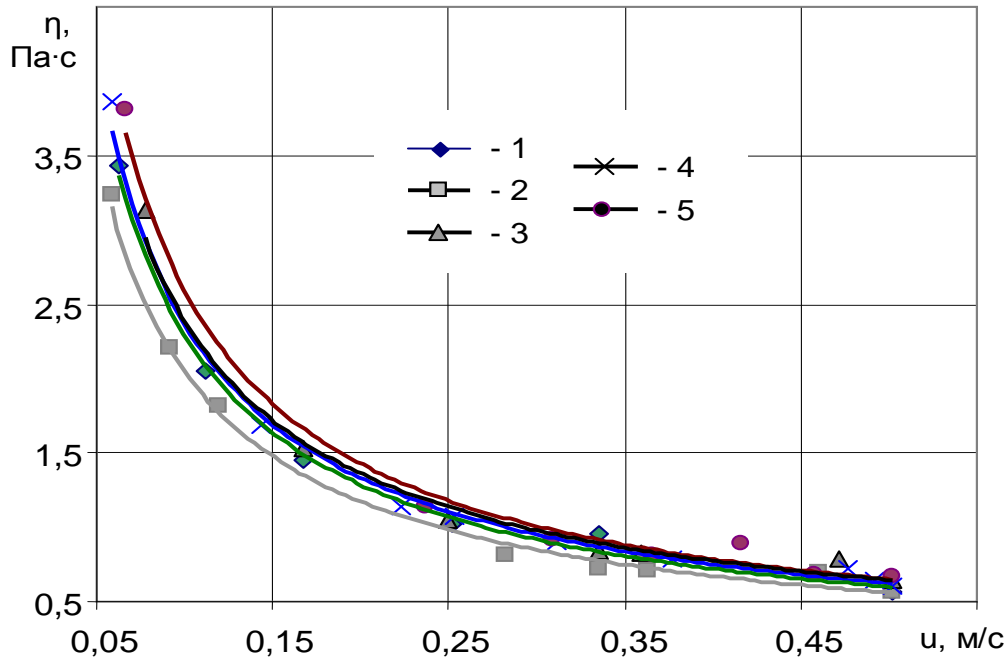


Рис. 4.8. Результати апроксимації коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  сапропелю вологістю  $W_1 = 95 \pm 1\%$  степенною функцією за гідростатичного тиску: 1 –  $P=0$  кПа; 2 –  $P=50$  кПа; 3 –  $P=100$  кПа; 4 –  $P=150$  кПа; 5 –  $P=200$  кПа

Поведена апроксимація експериментальних значень коефіцієнта в'язкості у діапазоні швидкості  $u > 0,05$  м/с без урахування впливу гідростатичного тиску степенною функцією (рис. 4.9) дозволила отримати наступні залежності:

$$\text{- для } W_1 = 95 \pm 1\% \quad \eta = 0,352 \cdot u^{-0,8156}; \quad (4.9)$$

$$\text{- для } W_1 = 90 \pm 1\% \quad \eta = 0,9083 \cdot u^{-0,9725}; \quad (4.10)$$

$$\text{- для } W_1 = 85 \pm 1\% \quad \eta = 2,5144 \cdot u^{-1,0273}. \quad (4.11)$$

Таким чином, результати експериментальних досліджень коефіцієнта динамічної в'язкості сапропелю о. Зяцьке дозволили виявити значний вплив на дану характеристику вологості покладів та швидкості відносного руху шарів. Вплив гідростатичного тиску суттєвим є лише за швидкості  $u < 0,05$  м/с. Оскільки зростання швидкості відносного руху шарів спричинює зниження

коефіцієнта в'язкості, то досліджуваний матеріал слід віднести за відомою класифікацією до псевдопластичних матеріалів [61]. Зважаючи на значний діапазон зміни коефіцієнта динамічної в'язкості сапропелю о. Зяцьке залежно від його вологості та швидкості зсуву для практичних розрахунків доцільно використовувати залежності (4.9)-(4.11).

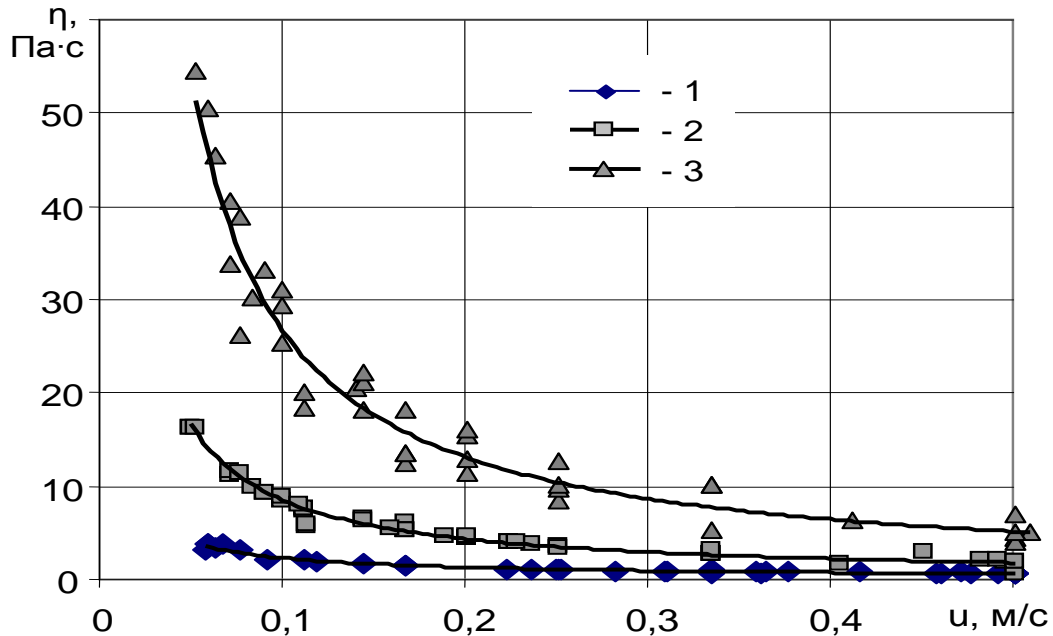


Рис. 4.9. Результати апроксимації коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  сапропелю степенною функцією за його вологості: 1 –  $W_1 = 95 \pm 1\%$ ; 2 –  $W_2 = 90 \pm 1\%$ ; 3 –  $W_3 = 85 \pm 1\%$

Також, як зазначалось у п. 3.7., було проведено визначення динамічної в'язкості концентрованого миючого засобу за методикою описаною у п. 3.6 лише з тією різницею, що вплив гідростатичного тиску не досліджувався. Середні значення коефіцієнта динамічної в'язкості досліджуваного миючого засобу (ТУ У 24.5 23731918-010-2003) за різних швидкостей шарів наведені у табл. 4.7 за якими побудована графічна залежність (рис.4.10).

Таблиця 4.7.

Середні значення коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  миючого засобу (ТУ У 24.5 23731918-010-2003) та відповідні їм швидкості шарів  $u$

$\eta$ , Па·с	15,46	9,74	7,59	6,16	4,86	4,68	4,01	3,75	2,41	1,5	0,91	0,72	0,57	0,535
$u$ , м/с	0,006	0,011	0,016	0,022	0,030	0,035	0,044	0,050	0,084	0,144	0,251	0,335	0,452	0,502

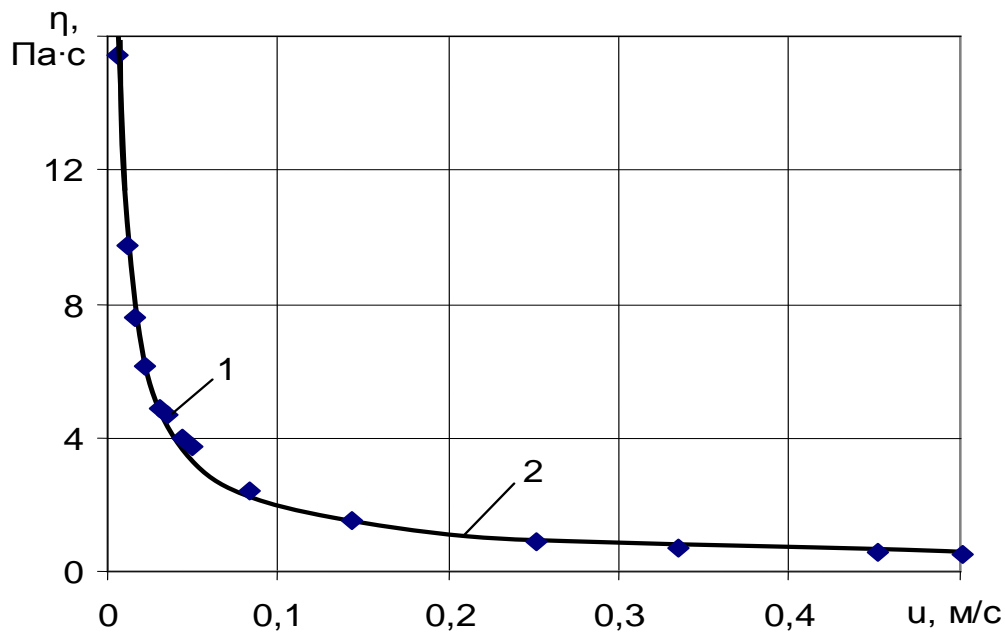


Рис. 4.10. Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  миючого засобу від швидкості шарів  $u$ : 1 – експериментальні дані; 2 – апроксимація експериментальних даних степеневою функцією

У результаті апроксимація експериментальних значень в'язкості  $\eta$  миючого засобу степеневою функцією було отримано наступну залежність

$$\eta = 0,327 \cdot u^{-0,7714} . \quad (4.12)$$

Отримані значень в'язкості  $\eta$  та коефіцієнти степеневої функції (4.12) вказують на те, що за величиною досліджуваної характеристики даний миючий засіб близький до досліджуваного сапропелю вологістю  $W_l = 95 \pm 1\%$ .

#### 4.5. Результати дослідження траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості

Для перевірки адекватності математичної моделі руху повітряної бульбашки, як елемента повітряного потоку, та обґрунтування параметрів системи подачі повітря у забірний пристрій було проведено експериментальні дослідження форми повітряного потоку у рідинах різної в'язкості.

Дослідження проводились на лабораторній установці фото якої наведено на рис. 3.5. Під час експерименту у якості досліджуваних рідин використовувалась вода, масло індустриальне SAE 40 та концентрований миючий засіб (ТУ У 24.5 23731918-010-2003).

За отриманими експериментально фотографічними зображеннями проведено графічне обмеження потоку повітря під час його руху у зазначених рідинах. За отриманими таким чином координатами ліній, що обмежують потік повітря побудовані точкові графіки. На рис. 4.11-4.15 наведені результати дослідження даного явища у воді, на рис. 4.16-4.19 – у маслі індустриальному, а на рис. 4.20-4.24 – у концентрованому миючому засобі. На вказаних рисунках відображені попарно лінії, що обмежують форму меж повітряного потоку із правої та лівої сторін за визначеного тиску подачі повітря у шестикратній повторності (подано по шість точок).

Аналіз отриманих точкових графіків підтвердив значний вплив на форму меж повітряного потоку в'язкості рідини. Так у випадку подачі повітря під тиском 400 кПа із сопла діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на  $45^0$  у воду із в'язкістю  $\eta = 0,001004 \text{ І } \dot{\text{а}} \cdot \ddot{\text{н}}$  найбільше горизонтальне переміщення бульбашок повітря на висоті  $y = 200$  мм досягає  $x = 150$  мм (рис. 4.13), а для тих же умов у випадку подачі в середовище індустриального масла із в'язкістю  $\eta = 0,0275 \text{ І } \dot{\text{а}} \cdot \ddot{\text{н}}$  даний показник становить  $x = 110 - 120$  мм (рис. 4.18). Під час подачі повітря під тиском 500 кПа із сопла діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на  $45^0$  у концентрований миючий засіб, в'язкість якого залежить від швидкості зміщення шарів і для умов експерименту знаходиться у межах  $\eta = 0,5 - 1,5 \text{ І } \dot{\text{а}} \cdot \ddot{\text{н}}$ , найбільше горизонтальне переміщення бульбашок повітря на висоті  $y = 200$  мм не перевищує  $x = 100$  мм (рис. 4.22).

Також встановлено, що для рідин із низькою в'язкістю (вода та масло індустриальне) зміна кута нахилу осі вихідного отвору із  $0^0$  на  $45^0$  має вплив на форму та координати обмежуючих кривих повітряного потоку лише у межах висот підйому  $y = 150$  мм (рис. 4.13, 4.14 та рис. 4.16, 4.17).



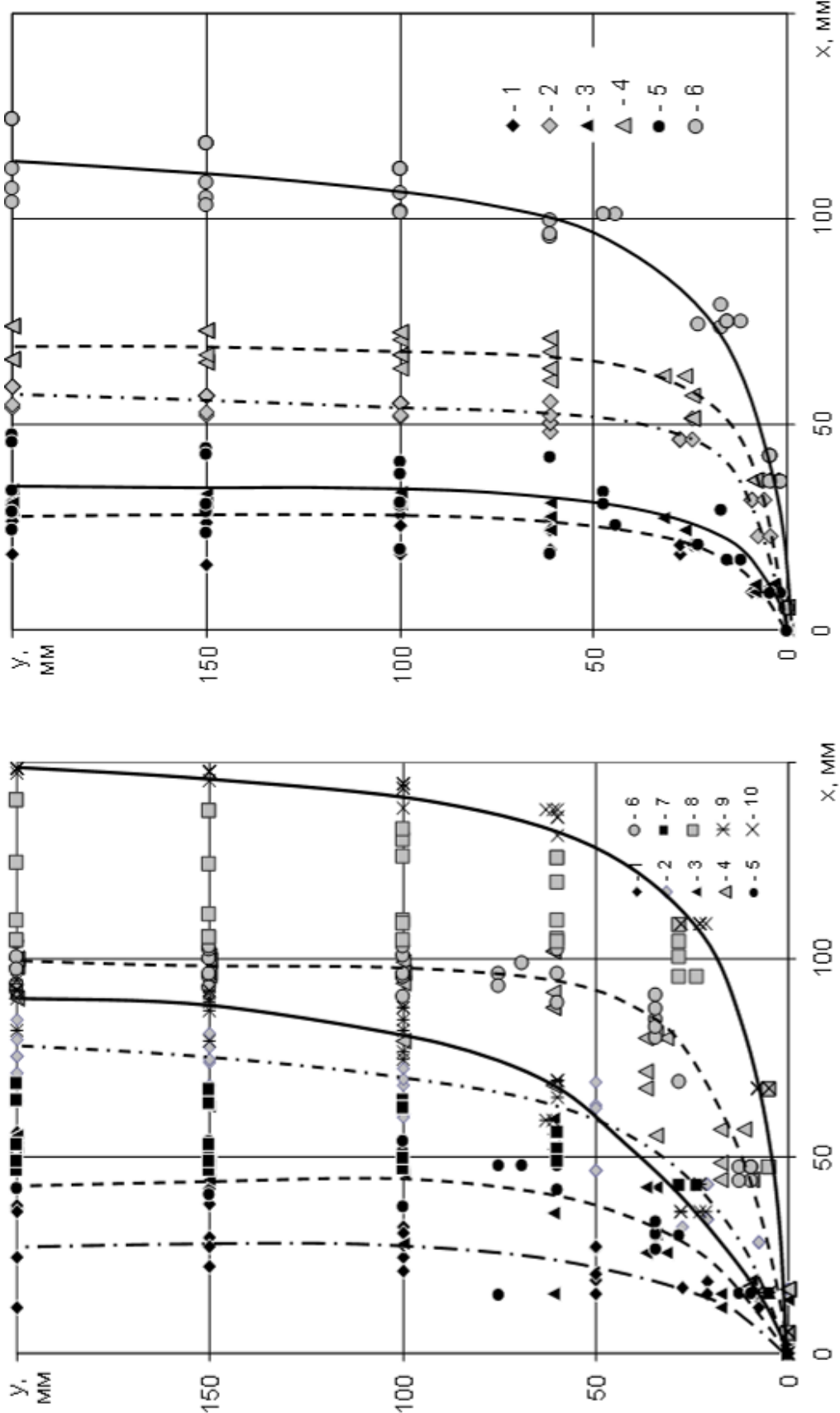


Рис. 4.11. Форми меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із сопла діаметром 0,5 мм відхиленого від горизонту на 45° за тиску подачі повітря: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300 кПа; 7-8 – 400 кПа; 9-10 – 500 кПа

Рис. 4.12. Форми меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із горизонтального сопла діаметром 0,5 мм за тиску подачі повітря: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 500 кПа

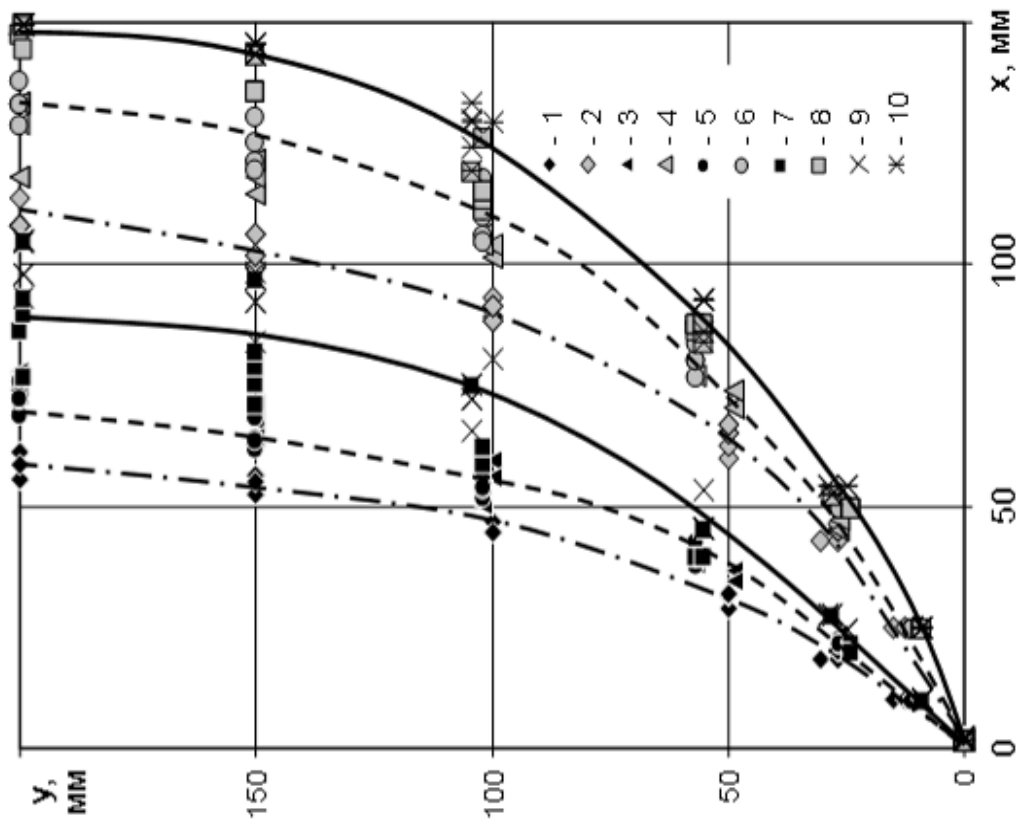


Рис. 4.13. Форми меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із сопла діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі повітря: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300кПа; 7-8 – 400 кПа; 9-10 – 500 кПа

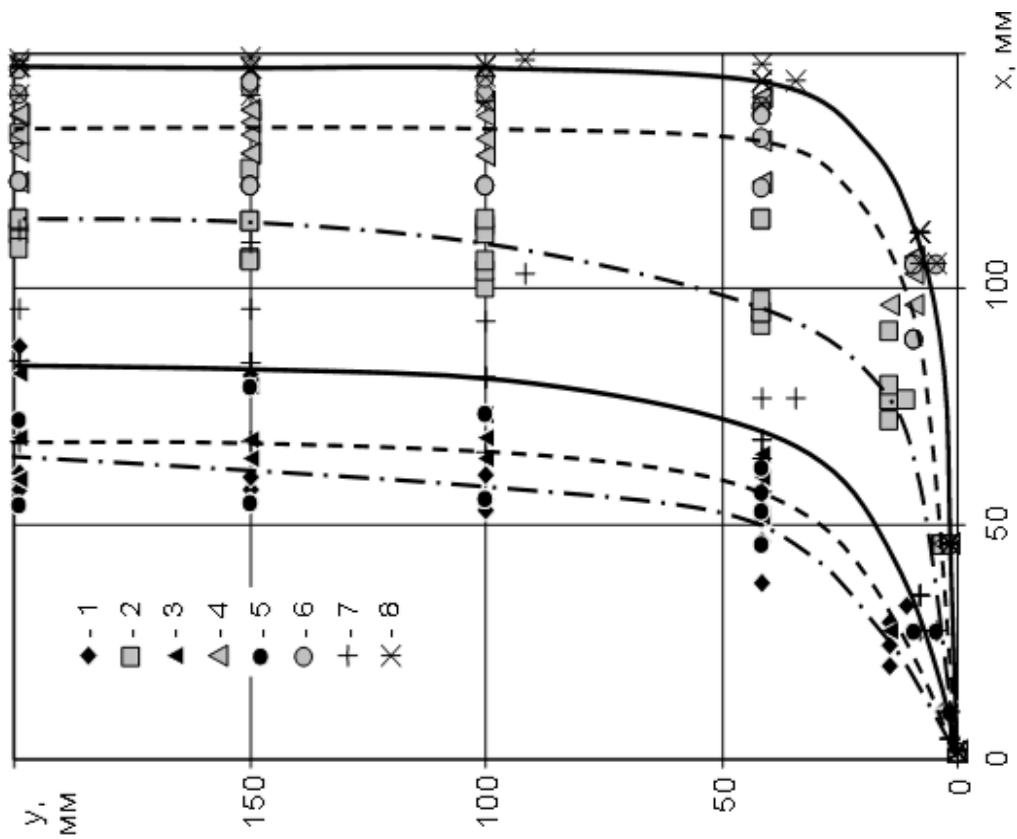


Рис. 4.14. Форми меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із горизонтального сопла діаметром 1,0 мм за тиску подачі повітря: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300 кПа; 7-8 – 500 кПа

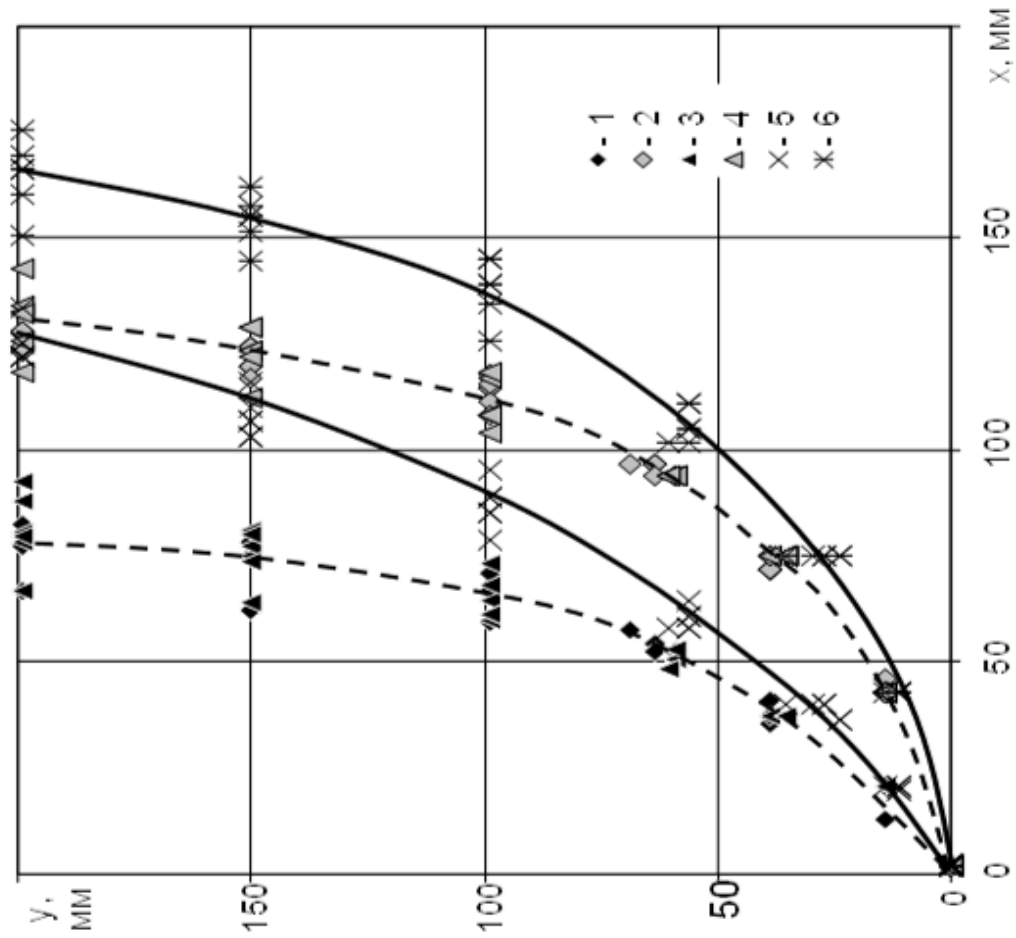


Рис. 4.15. Форми меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із сопла діаметром 1,5 мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі повітря: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 500 кПа

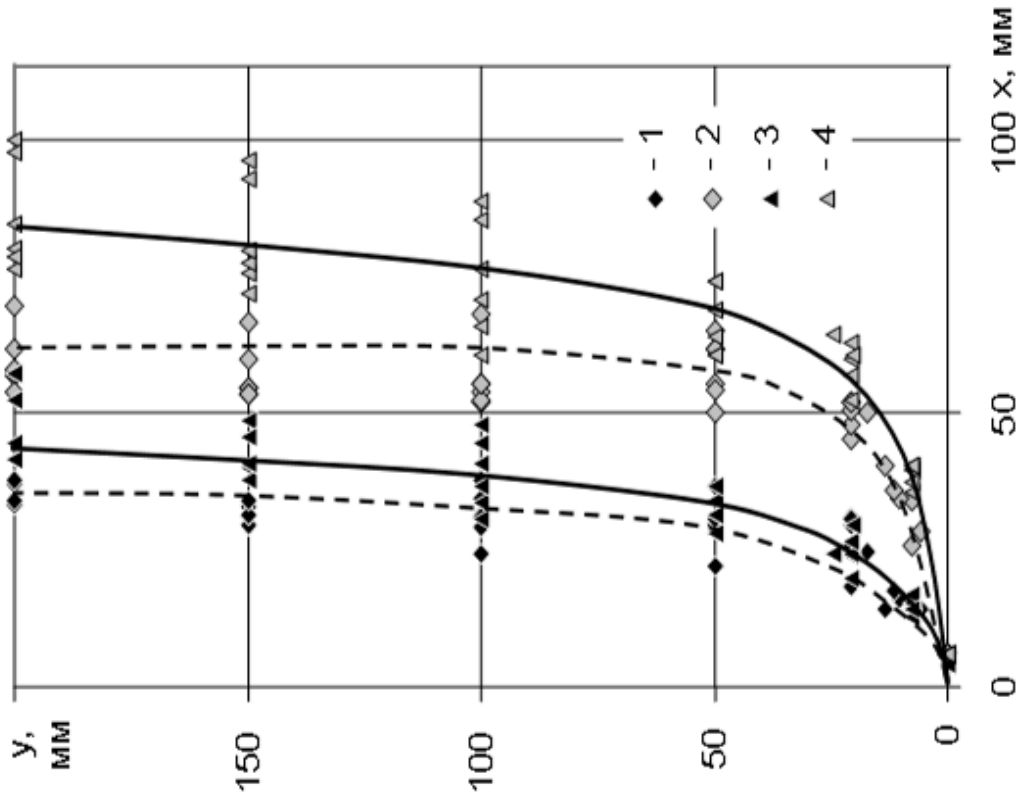


Рис. 4.16. Форми меж повітряного потоку під час його руху у маслі індустріальному після виходу із сопла діаметром 0,5 мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі повітря: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа

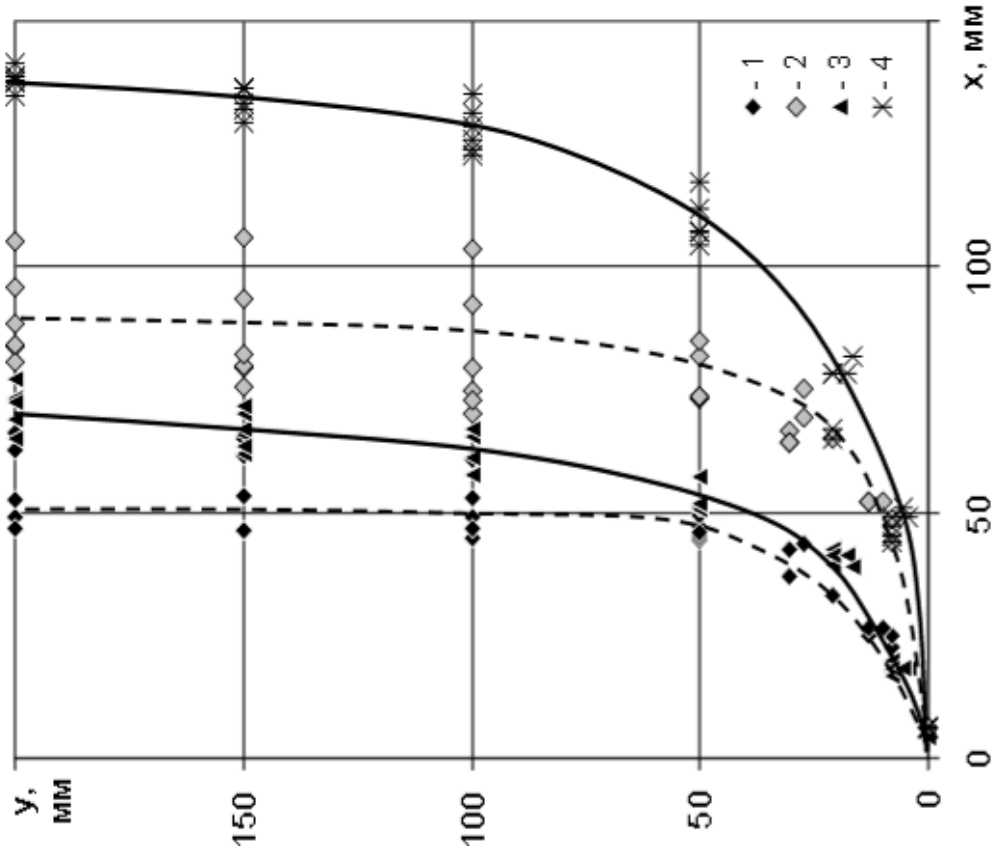


Рис. 4.17. Форми меж повітряного потоку під час його руху у маслі індустріальному після виходу із горизонтального сопла діаметром 0,5 мм за тиску подачі повітря: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 400 кПа

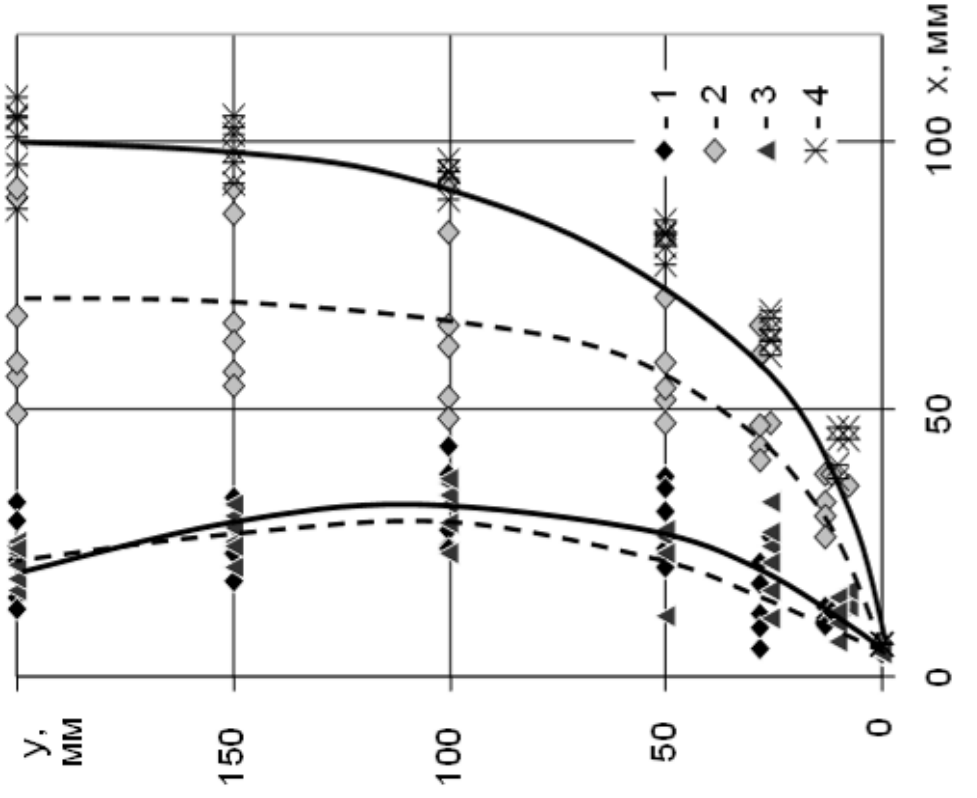


Рис. 4.18. Форми меж повітряного потоку під час його руху у маслі індустріальному після виходу із сопла діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на 45° за тиску подачі повітря: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 400 кПа

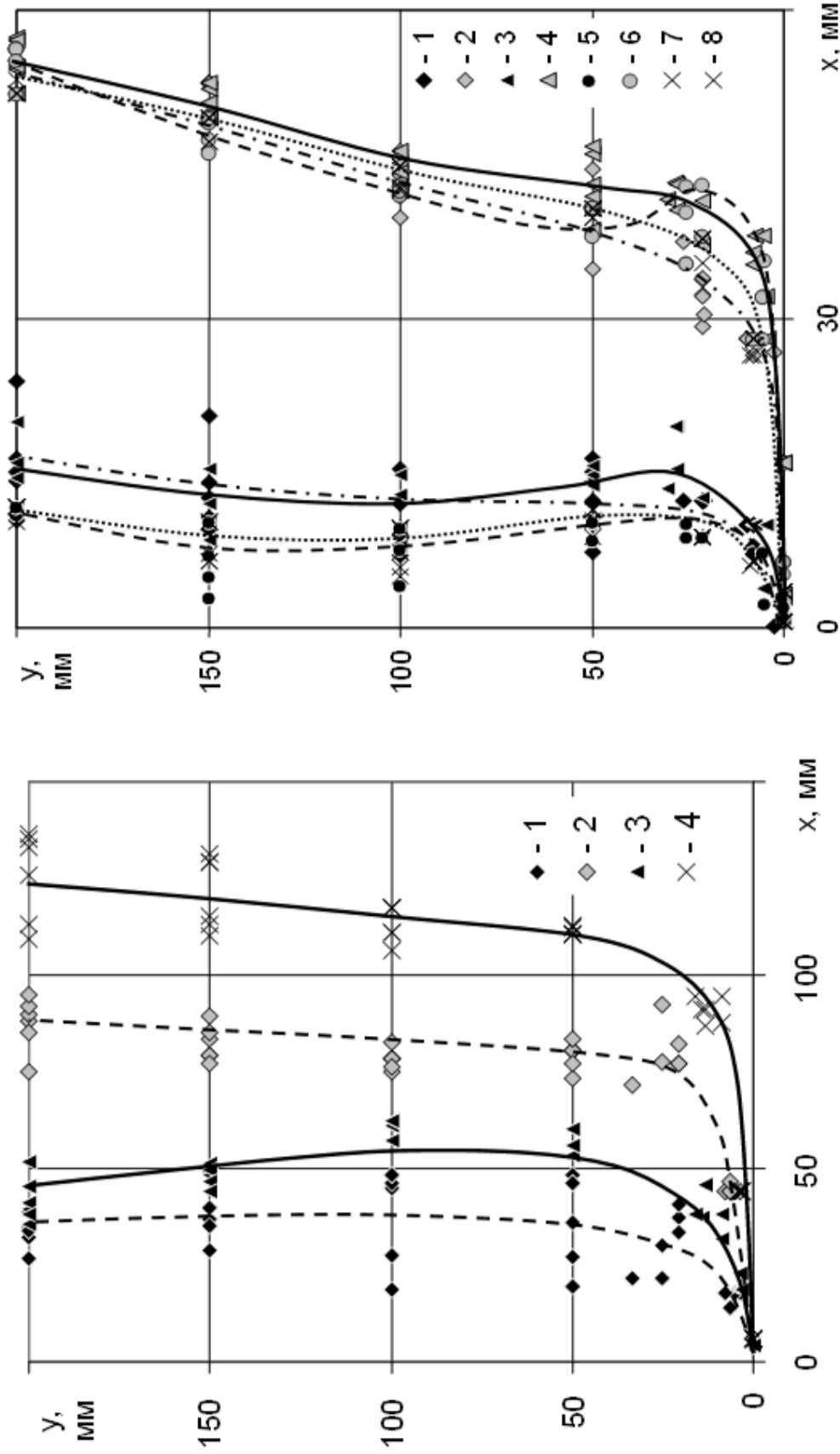


Рис. 4.19. Форми меж повітряного потоку під час його руху у маслі індустріального сопла діаметром 1,5 мм за тиску подачі повітря: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа

Рис. 4.20. Форми меж повітряного потоку під час його руху у миючому засобі після виходу із горизонтального сопла діаметром 0,5 мм за тиску подачі повітря: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300 кПа; 7-8 – 400 кПа

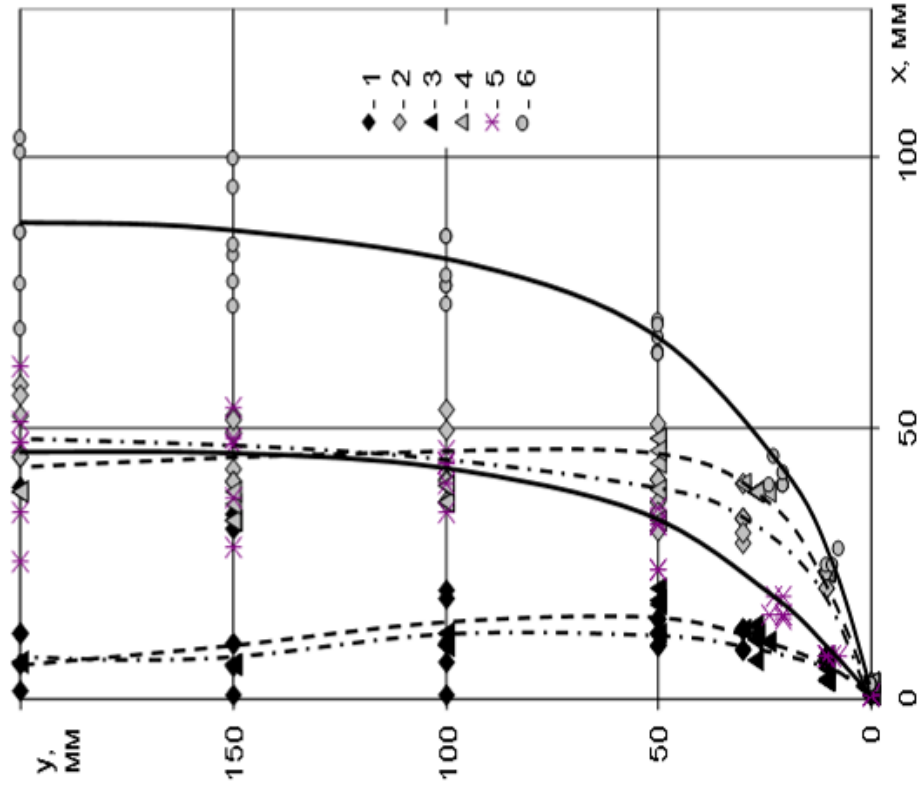


Рис. 4.22. Форми меж повітряного потоку під час його руху у миючому засобі після виходу із сопла діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі повітря: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 500 кПа

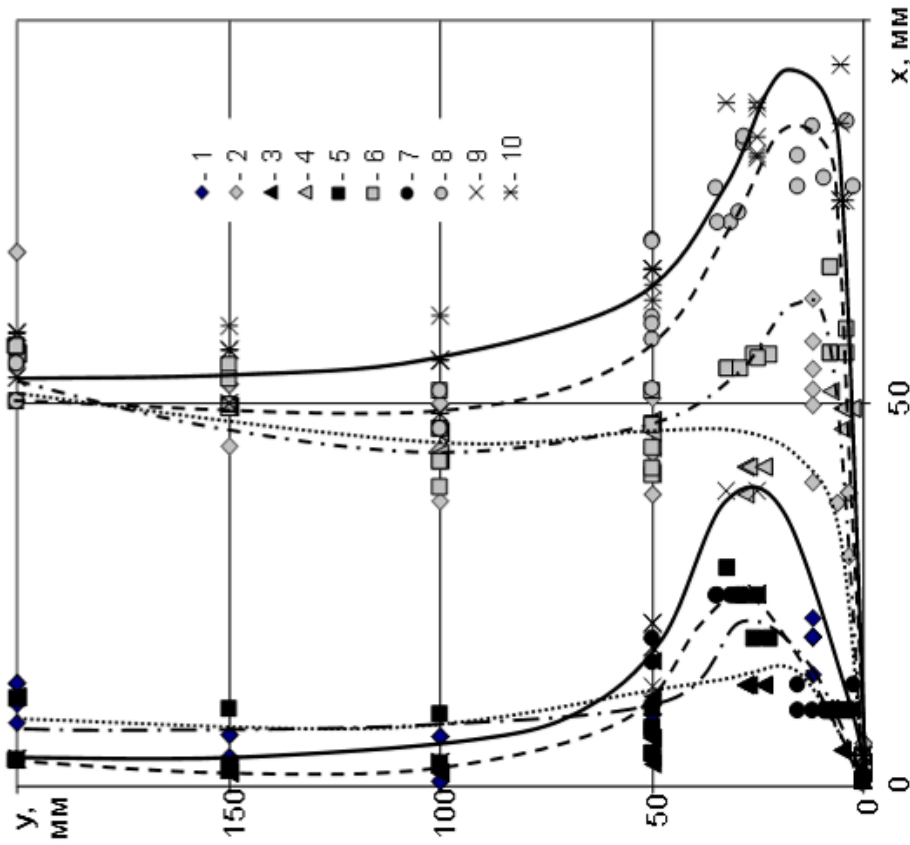


Рис. 4.21. Форми меж повітряного потоку під час його руху у миючому засобі після виходу із горизонтального сопла діаметром 1,0 мм за тиску подачі повітря: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300 кПа; 7-8 – 400 кПа; 9-10 – 500 кПа

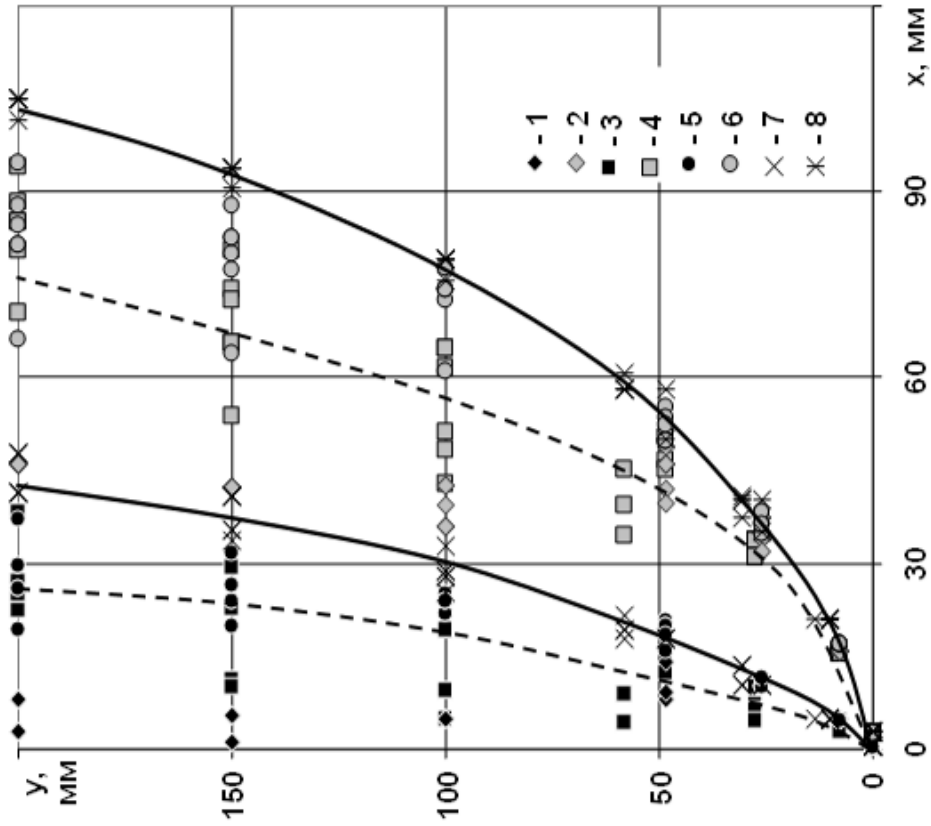


Рис. 4.23. Форми меж повітряного потоку під час його руху у миючому засобі після виходу із сопла діаметром 1,5 мм відхиленого від горизонту на 45° за тиску подачі повітря: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300 кПа; 7-8 – 500 кПа

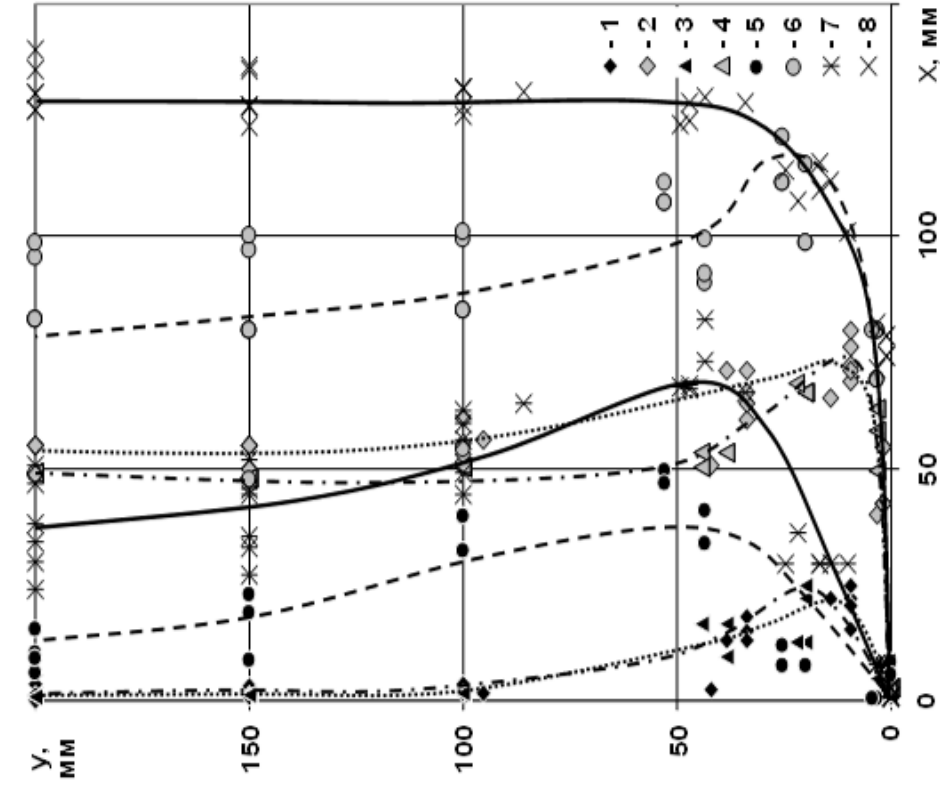


Рис. 4.24. Форми меж повітряного потоку під час його руху у миючому засобі після виходу із горизонтального сопла діаметром 1,5 мм за тиску подачі повітря: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200кПа; 5-6 – 300 кПа; 7-8 – 500 кПа

У той же час за подачі повітря через горизонтальне сопло, діаметром 1,0-1,5 мм у концентрований миючий засіб, спостерігається завихрення повітряного потоку (рис. 4.21, 4.24). Інтенсифікація даного явища спостерігається для сопла діаметром 1,0 мм у діапазоні тисків подачі повітря 300-500 кПа (рис. 4.21 криві 6, 8, 10), а для сопла діаметром 1,5 мм – 200-300 кПа (рис. 4.24 криві 4 та 6). Для сопла діаметром 1,5 мм за тиску подачі повітря 500 кПа (рис. 4.24 крива 8), а також для сопла діаметром 0,5 мм у діапазоні тисків 100-500 кПа (рис. 4.20) дане явище відсутнє. Для випадку експерименту із концентрованим миючим засобом та кутом нахилу осі вихідного сопла  $45^{\circ}$  явище завихрення не виникає, а тому максимальне горизонтальне відхилення повітряного потоку на висоті  $y = 200$  мм є більшим ніж у випадках із завихренням (рис. 4.22 крива 6, рис. 2.23 криві 4 та 6).

Збільшення діаметра вихідного сопла та тиску подачі повітря, а отже і величини об'ємної подачі повітря веде до зростання площі поперечного перерізу потоку (рис. 4.11, 4.12, 4.19). Зменшення швидкості повітряного потоку із висотою підйому спричинює зростання площі його поперечного перерізу. Стабілізація даного показника спостерігається у межах висот підйому  $y = 50...100$  мм.

Порівняння експериментальних значень та форми кривих із графічними залежностями побудованими за математичною моделлю (2.16) вказують на адекватність даної моделі.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили адекватність математичної моделі розробленої у п. 2.4. Також дані дослідження вказують, що з метою кращого розпушення покладів пониженої вологості можна використовувати завихрений повітряний потік. Завихрення досягається за горизонтального розташування осі вихідного сопла із діаметром у діапазоні 1-1,5 мм та тиску подачі повітря 300-400 кПа. А під час добування покладів, що не вимагають попереднього значного розпушення доцільно використовувати сопла із кутом нахилу їх осі до горизонту  $45^{\circ}$ . Оскільки у цьому випадку енергія



повітряного потоку максимально буде використовуватись на підймання покладів у трубопроводі.

#### **4.6. Результати дослідження продуктивності забірною пристрою для добування сапропелю і структури потоку двохкомпонентного середовища у висхідній течії корпусу та підйимального трубопроводу**

Для отримання залежності продуктивності забірною пристрою для добування сапропелю від досліджуваних факторів у вигляді рівняння регресії було проведено трифакторний експеримент згідно з методикою, що описана у п. 3.8. із використання зразків сапропелю добутих із озера Зяцьке. Метою експерименту було визначення маси сапропелю, що подається забірним пристроєм за одиницю часу при варіюванні таких факторів як: тиск нагнітання повітря, товщина шару сапропелю та довжина підйимального трубопроводу.

Обробка даних трифакторного експерименту, проведеного за симетричним некомпозиційним планом Бокса-Бенкіна другого порядку, здійснювалась на ПЕОМ розробленою програмою у середовищі Mathcad. При цьому однорідність ряду дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена (3.18). Оскільки  $G^{дiсд.} = 0,313 < G^{табл} (0,05; 15; 2) = 0,335$  [51] то процес відтворюється.

Під час визначення довірчих інтервалів коефіцієнтів регресії використовували критерій Ст'юдента, табличне значення якого за 5-% рівня значущості та числі ступенів вільності дисперсії відтворюваності дослідів  $f_1=2$  становило  $t=4,3$  [51].

Перевірку значущості коефіцієнтів регресії проводили за встановленими їх довірчими інтервалами та коваріаціями.

У результаті, рівняння регресії набуло вигляду:

$$\begin{aligned} \bar{y} = & 8,822 + 3,058x_1 + 5,387x_2 - 2,104x_3 - 0,415x_1^2 + \\ & + 0,993x_2^2 - 0,39x_3^2 + 0,993x_1x_2. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Перевірку гіпотези адекватності отриманого рівняння регресії проводили за критерієм Фішера. Розрахункове значення даного критерію при

дисперсії неадекватності  $S_{i\text{ààä.}}^2=3,102$  і дисперсії відтворюваності досліджу  $S_y^2=0,028$  становило  $F^{\text{дi çä.}}=2,189$ . Табличне значення критерію Фішера за прийнятого 5% значущості, згідно [51], склало:

$$F^{\text{ä ää.}}(0,05; f_2; f_1) = 19,38,$$

де  $f_2 = 7$  – число ступенів вільності дисперсії неадекватності;

$f_1 = 2$  – число ступенів вільності дисперсії відтворюваності досліджу.

Оскільки,  $F^{\text{дi çä.}}=2,189 < F^{\text{ä ää.}}(0,05; f_2; f_1) = 19,38$ , то гіпотеза адекватності рівняння регресії підтверджується.

Остаточо рівняння регресії із факторами набуло вигляду:

$$Q = 3,54467 + 0,01408 \cdot P - 10,73 \cdot h + 0,472 \cdot l - 0,0000415 \cdot P^2 + \\ + 11,03333 \cdot h^2 - 1,56 \cdot l^2 + 0,0331 \cdot P \cdot h, \quad (4.10)$$

де  $P$  – тиск нагнітання подачі повітря, кПа;

$h$  – товщина шару сапропелю з під якого ведеться добування, м;

$l$  – довжина піднімального трубопроводу, м.

Для відслідкування динаміки зміни продуктивності за отриманим рівнянням регресії були побудовані поверхні відгуку (рис. 4.25).

На основі візуального спостереження за рухом повітряно-сапропелевого потоку встановлено, що структура даного потоку не є гомогенною. У забірному пристрої вона складається з окремих бульбашок різного розміру які при висхідному русі поступово об'єднуються, що призводить до формування бульбашкової структури руху середовища, а у підіймальному трубопроводі вона складається із великих бульбашок (снарядів) і сапропелевих пробок. Пробки у свою чергу містять газову фазу у вигляді дрібних бульбашок. Снаряди повітря та пробки сапропелю рухаються почергово. У пристінній плівці відбувається зворотній рух сапропелю. Це означає, що дане явище підпорядковується снарядній структурі руху повітряно-сапропелевого потоку [3, 121].

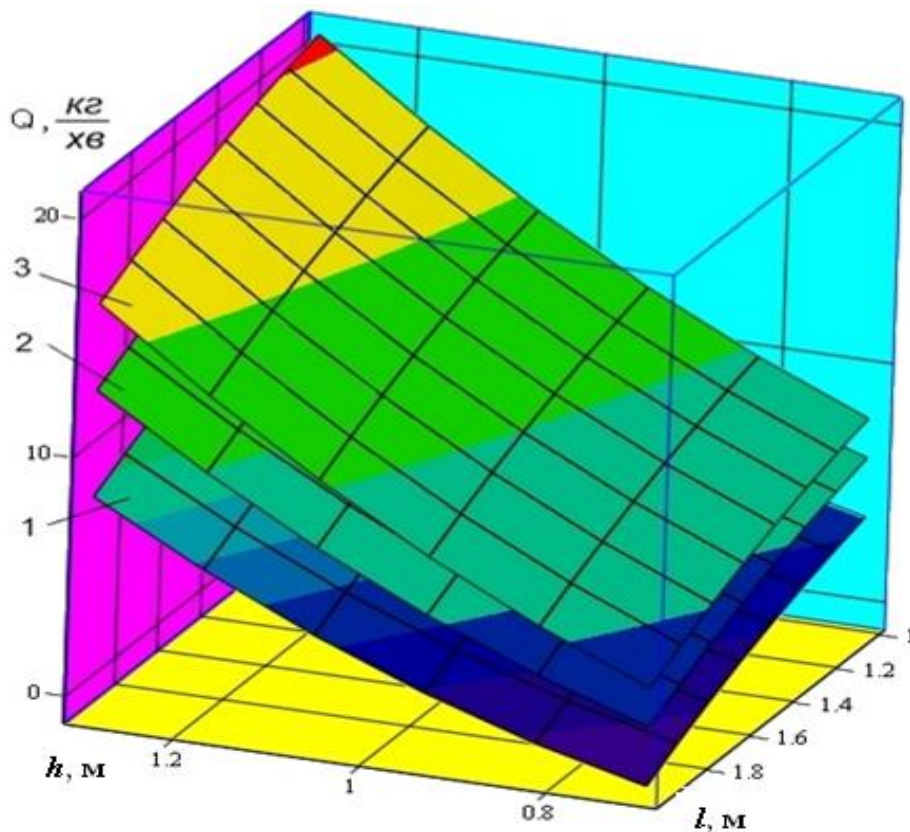


Рис. 4.25. Залежність продуктивності  $Q$  пневматичного забірною пристрою від глибини залягання сапропелю  $h$  та довжини трубопроводу  $l$  при тиску нагнітання повітря: 1 –  $P=100$  кПа; 2 –  $P=200$  кПа; 3 –  $P=300$  кПа

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

Також можна констатувати, що за досліджуваних значень конструктивних та технологічних параметрів спостерігається снарядний режим руху висхідного повітряно-сапропелевого потоку.

#### 4.7. Висновки до розділу 4

1. Дослідження фізичних властивостей сапропелю озера Зяцьке виявили чіткий вплив глибини залягання на досліджувані показники. Так вологість сапропелів даного родовища у середньому знижується на 1,3% із кожним метром збільшення глибини залягання. Але у межах глибин 1...4 м швидкість зменшення вологості із зростанням глибини залягання знаходиться у межах 2,0...2,5 %/м. Для розрахунку значень вологості сапропелю даного родовища доцільно використовувати залежність (4.2).
2. Дослідження зольності сапропелів озера Зяцьке підтвердили їх належність до органічного типу, а також встановлено, що даний показник зростає у середньому на 1,4 % із кожним метром збільшення глибини залягання. Для розрахунку значень зольності сапропелю досліджуваного родовища доцільно використовувати залежність (4.3).
3. Об'ємна маса сапропелю озера Зяцьке коливається у межах  $\gamma = 1010...1285$  кг/м<sup>3</sup>, при цьому із кожним метром збільшення глибини залягання досліджуваний показник зростає приблизно на 30,5 кг/м<sup>3</sup>. Розрахунок об'ємної маси сапропелю даного родовища доцільно проводити за формулою (4.5).
4. Узагальнена оцінка покладів за вмістом абсолютно сухої речовини вказує, що найбільш цінні поклади розташовані на глибині понад 4 м. Тому для досягнення максимального ефекту від добутих покладів слід починати їх розробку із шарів які знаходяться у межах глибин 4...5 м.
5. На величину коефіцієнта в'язкості сапропелю має значний вплив вологість покладів та швидкість відносного руху шарів. Вплив гідростатичного тиску суттєвим є лише за швидкості  $u < 0,05$  м/с. Досліджуваний сапропель озера Зяцьке належить до псевдопластичних матеріалів. Для практичних розрахунків коефіцієнта динамічної в'язкості сапропелю залежно від його вологості та швидкості зсуву доцільно використовувати залежності (4.9)-(4.11).

6. У якості моделюючого середовища для дослідження руху повітряного потоку доцільно використовувати концентрований миючий засіб (ТУ У 24.5 23731918-010-2003), для якого закономірність зміни коефіцієнта в'язкості близька до аналогічної залежності для досліджуваного сапропелю вологістю  $W = 95 \pm 1\%$ .

7. Для розпушення покладів пониженої вологості доцільно використовувати завихрений повітряний потік. Завихрення досягається за горизонтального розташування осі сопла подачі повітря із діаметром у діапазоні 1...1,5 мм та надлишкового тиску подачі  $P=300...400$  кПа. А під час добування покладів, що не вимагають попереднього значного розпушення, доцільно використовувати сопла із кутом нахилу їх осі до горизонту  $45^{\circ}$ .

8. Експериментальні дослідження траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості підтвердили адекватність математичної моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь (2.16).

9. Суттєвий вплив на продуктивність засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм мають: тиск подачі повітря, глибини залягання сапропелю з якої ведеться добування та довжина піднімального трубопроводу (потрібна висота підняття сапропелю). За збільшення тиску повітря, продуктивність забірною пристрою збільшується, незалежно від глибини залягання покладів та довжини піднімального трубопроводу. За збільшення глибини залягання сапропелю, у досліджуваних межах, продуктивність пристрою зростає, а збільшення довжини піднімального трубопроводу над рівнем водного дзеркала спричинює часткове зменшення даного показника.

10. За робочого тиску подачі повітря  $P=100...300$  кПа, товщина шару сапропелю з під якої ведеться добування  $h=0,7...1,3$  м та довжини піднімального трубопроводу  $l=1,0...2,0$  м спостерігається снарядний режим руху висхідного повітряно-сапропелевого потоку.

## РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ВИРОБНИЧИХ ВИПРОБУВАНЬ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСОБУ ДЛЯ ДОБУВАННЯ САПРОПЕЛЮ

### 5.1. Методика лабораторно-виробничих випробувань засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм

Складність технологічного процесу підводного добування сапропелю не дозволяє повністю визначити раціональні конструктивні параметри і оптимальні режими роботи пристрою аналітичним шляхом та в умовах лабораторії. Тому, для встановлення впливу технологічних та конструктивних параметрів пневматичного забірної пристрою засобу для добування сапропелю на продуктивність останнього було проведено випробування у виробничих умовах із застосуванням математичного методу планування експерименту. Дані випробування проводили на о. Зяцьке. Максимальна товщина водного дзеркала складала 0,7 м.

Аналіз результатів теоретичного та експериментального дослідження процесу добування сапропелю показав, що визначальний вплив на даний процес мають такі конструктивно-технологічні параметри забірної пристрою: тиск подачі повітря, кут нахилу твірної конусоподібного корпусу, діаметр та довжина піднімального трубопроводу.

Для дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів засобу на його продуктивності у виробничих умовах виготовлена експериментальна установка (рис. 5.1) з пневматичним забірним пристроєм виконаним за схемою (рис.2.1). Дана установка дозволяє змінювати зазначені конструктивно-технологічні параметри за схемою:

- кут нахилу твірної конусоподібного корпусу  $\alpha=15^\circ$ ;  $20^\circ$ ;  $25^\circ$ ;
- діаметр піднімального трубопроводу  $d=0,043$  м;  $0,055$  м;  $0,067$  м;
- довжину піднімального трубопроводу  $l=1,5$  м;  $3$  м;  $4,5$  м;
- тиск подачі повітря  $P_{\text{н}}=300$  кПа;  $400$  кПа;  $500$  кПа.

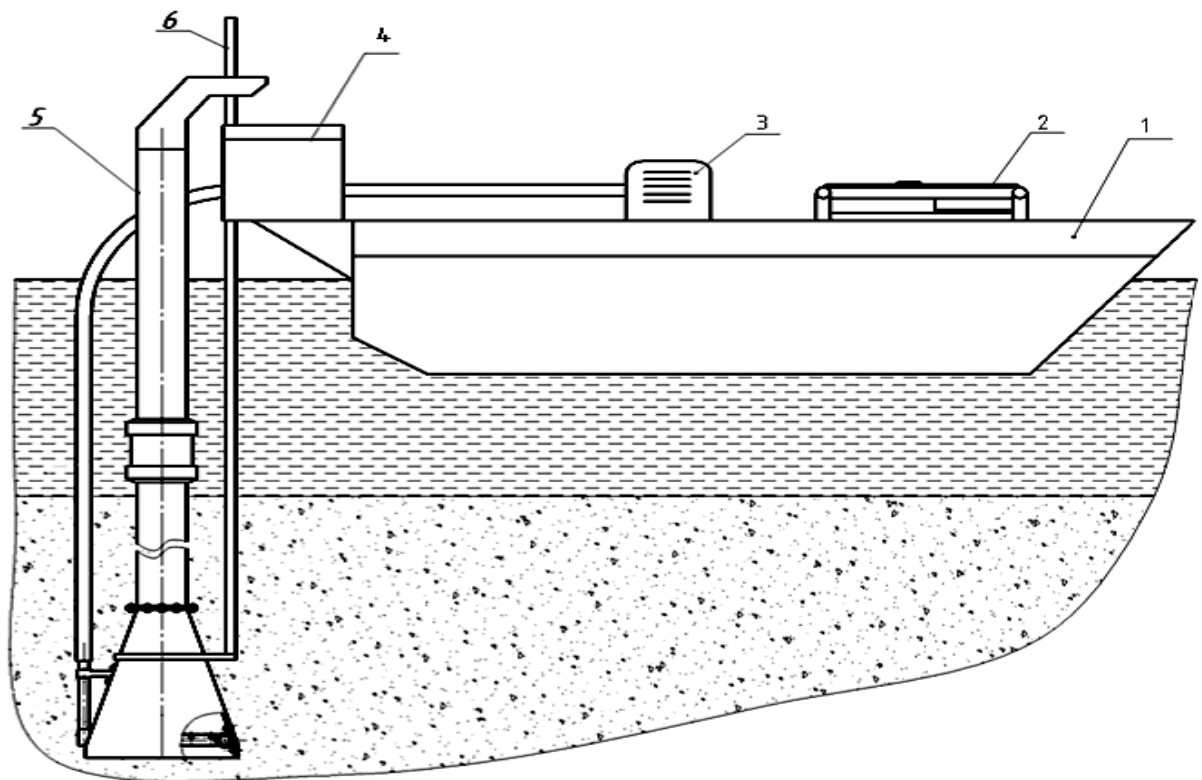


Рис. 5.1. Схема експериментальної установки засобу для добування сапропелю:  
 1 – плавзасіб; 2 – генератор; 3 – компресор; 4 – мірна посудина; 5 –  
 забірний пристрій; 6 – маніпулятор-глибиномір

Для проведення досліджень були виготовлені три конусоподібних корпуси із різним за величиною діаметром вхідного отвору, який визначався залежно від кута нахилу твірної конуса, а висота кожного з корпусів становила 0,4 м (рис. 5.2). Також була виготовлена багатоваріантна конструкція піднімальних трубопроводів. Кожен з трубопроводів складався з трьох відрізків довжиною по 1,5 м, які з'єднувались між собою герметичними різьбовими муфтами, а з корпусом – фланцевою муфтою. Під час збирання конструкції кожен її варіант оснащувався зовнішньою магістраллю подачі повітря та напірним повітропроводом всередині корпусу з соплами циліндричного перерізу діаметром 1,0 мм. Для забезпечення міцності і жорсткості конструкції передбачений збірний металевий каркас, який охоплює забірний корпус та кріпиться до піднімального трубопроводу.





Рис. 5.2. Фото пневматичного забірною пристрою експериментальної установки за його комплектування піднімальним трубопроводом діаметром  $d=0,067$  м та конусоподібним корпусом із кутом нахилу твірної: а –  $\alpha = 15^{\circ}$ ; б –  $\alpha = 20^{\circ}$ ; в –  $\alpha = 25^{\circ}$

Проведення повнофакторного експерименту здійснювали за симетричним некомпозиційним планом реалізації експерименту Бокса-Бенкіна другого порядку за складеною матрицею (додаток В, таблиця В. 1), та методикою наведеною у п. 3.9. Таблиця факторів і рівнів їх варіювання наведена у додатку В (таблиця В. 2). Планування експерименту і черговість проведення дослідів наведено у додатку В, таблиця В. 3. Зв'язок між закодованими і натуральними величинами факторів встановлювався залежностями:



$$x_1 = \frac{P_i - P_0}{\varepsilon_1}; \quad x_2 = \frac{\alpha - \alpha_0}{\varepsilon_2}; \quad x_3 = \frac{d - d_0}{\varepsilon_3}; \quad x_4 = \frac{l - l_0}{\varepsilon_4}. \quad (5.2)$$

де  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – кодові значення факторів, відповідно: тиск подачі повітря, кут нахилу твірної конусоподібного корпусу, діаметр та довжина піднімального трубопроводу;

$P_n, \alpha, d, l$ , – натуральні значення факторів, відповідно: тиск подачі повітря, кут нахилу твірної конусоподібного корпусу, діаметр та довжина піднімального трубопроводу;

$P_0, \alpha_0, d_0, l_0$ , – натуральні значення факторів на нульовому рівні;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ , – інтервали варіювання факторів.

Реалізація експерименту полягала у наступному. Забірний пристрій для добування сапропелю занурювався безпосередньо в поклади сапропелю на глибину визначену довжиною піднімального трубопроводу. Після чого запускали бензиновий генератор 9 (рис.5.1.), який застосовувався в якості джерела електричної енергії та компресор 8. Ресивер компресора наповнювали атмосферним повітрям до тиску  $P_n=800$  кПа. Потім відкривали золотник компресора, через який надходило стиснуте повітря до робочого органу через пневмопровід під тиском встановленим планом експерименту. При цьому підтримувалась постійна робота компресора. Після запуску засобу та набуття ним усталеного режиму роботи фіксувалась секундна продуктивність. Досліди проводились у трикратній повторюваності для кожного з варіантів комплектації забірної пристрою. Оскільки процес добування був неперервним, то пристрій при роботі поступово занурювався через забір матеріалу, тому глибина добування  $h$  змінювалась від початку проведення кожного з експериментів і до завершення в межах 0,2...0,5 м. Експериментальні значення випробування засобу для добування сапропелю наведені у додатку В, таблиця В. 4).

Нелінійний характер очікування функції відгуку у (продуктивність пристрою) в області факторного простору подана у вигляді рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + \\ + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2. \quad (5.3)$$

Коефіцієнти регресії після реалізації плану експерименту визначали за наступними формулами [47]:

$$b_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}; \quad (5.4)$$

$$b_j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n x_{ji} y_i; \quad (5.5)$$

$$b_{jj} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^n x_{ji}^2 y_i - \frac{1}{48} \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n x_{ji}^2 y_i - \frac{1}{2n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}; \quad (5.6)$$

$$b_{jr} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n x_{ji} x_{ri} y_i; \quad (5.7)$$

де  $u$  – номер дослідів в центрі плану;

$n_0$  – кількість дослідів в центрі плану;

$r, j$  – номери фактору дослідів, причому у формулі (5.7)  $r \neq j$ ;

$p$  – кількість факторів;

$i$  – номер дослідів;

$n$  – кількість дослідів;

$y_i$  – значення функції відгуку в  $i$ -му досліді;

$x_{ji}, x_{ri}$  – кодовані значення  $j$ -го чи  $r$ -го фактору в  $i$ -му досліді;

$y_{0u}$  – значення функції відгуку в  $u$ -му досліді в центрі плану.

Оскільки експерименти проводились із однаковим числом повторностей, то однорідність ряду дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена за формулами наведеними у п. 3.9.

Дисперсію відтворення експерименту визначаємо за результатами дослідів в центрі плану за формулою (3.21).

Дисперсії коефіцієнтів регресії та неадекватності визначали за формулами:

$$S_{b_0}^2 = \frac{1}{n_0} S_y^2; \quad (5.8)$$

$$S_{b_j}^2 = \frac{1}{12} S_y^2; \quad (5.9)$$

$$S_{b_{jr}}^2 = 0,25 \cdot S_y^2; \quad (5.10)$$

$$S_{b_{jj}}^2 = 0,1875 \cdot S_y^2; \quad (5.11)$$

$$\text{cov}_{b_0 b_{jj}} = -0,16667 \cdot S_y^2; \quad (5.12)$$

$$\text{cov}_{b_{jj} b_{rr}} = 0,0625 \cdot S_y^2. \quad (5.13)$$

Довірчі інтервали коефіцієнтів регресії знаходили використовуючи табличне значення критерію Ст'юдента  $t(0,05; f)$  за 5%-го рівня значущості та  $f = n_0 - 1$  – числа ступенів вільності в центрі плану:

$$\Delta b_0 = t \cdot S_{b_0}; \quad \Delta b_j = t \cdot S_{b_j}; \quad \Delta b_{jr} = t \cdot S_{b_{jr}}; \quad \Delta b_{jj} = t \cdot S_{b_{jj}}. \quad (5.14)$$

Якщо коефіцієнт регресії виявлявся меншим довірчого інтервалу, то його вважали статистично незначущими. Проте видаляли із моделі лише ті коефіцієнти, які не корелювали ні з яким іншим. Оскільки, у протилежному випадку, рівняння регресії може виявитись неадекватним.

Гіпотезу адекватності отриманої моделі перевіряли за допомогою  $F$ -критерію (критерію Фішера) з використання формул (3.32)-(3.34).

Розроблена методика проведення експериментів згідно з планом Бокса-Бенкіна дозволяє отримати математичну модель добування сапропелю засобом із пневматичним забірним пристроєм у вигляді рівнянь регресії, функцією відгуку якої є значення його продуктивності.

## **5.2. Результати лабораторно-виробничих випробувань засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм**

Для отримання математичної моделі процесу добування сапропелю засобом із пневматичним забірним пристроєм було реалізовано чотирифакторний експеримент згідно з методикою, описаною в п. 5.1.

Мета проведення експерименту полягала у визначенні маси сапропелю, що добувалась пристроєм за одиницю часу при варіюванні таких факторів, як: тиск подачі повітря, кут нахилу твірної конусоподібного корпусу, діаметр та довжина піднімального трубопроводу.

Обробка результатів чотирифакторного експерименту здійснювалась на ПЕОМ за допомогою розробленої у середовищі Mathcad 14 програми (див. Додаток Г) згідно з трирівневим планом другого порядку Бокса-Бенкіна. При цьому однорідність ряду дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена. Оскільки  $G^{\delta i \zeta \delta} = 0,222 < G^{\delta \hat{a} \hat{a} \hat{a}}(0,05; 27; 2) = 0,318$  [47], то процес відтворюється.

При визначенні довірчих інтервалів коефіцієнтів регресії використовували критерій Ст'юдента, табличне значення якого за 5%-го рівня значущості та числі ступенів вільності дисперсії відтворюваності дослідів  $f_1 = 2$  становило  $f_1 = 4,3$  [47]. Перевірку значущості коефіцієнтів регресії проводили за встановленими довірчими інтервалами та коваріаціями. У результаті рівняння регресії набуло вигляду:

$$y = 0,45 + 0,072x_1 + 0,24x_2 + 0,12x_3 - 0,121x_4 + 0,068x_1x_3 + 0,079x_2x_3 - 0,077x_3x_4 + 0,066x_1^2 - 0,019x_2^2 + 0,06x_3^2 + 0,069x_4^2 \quad (5.15)$$

Перевірку адекватності отриманого рівняння регресії (5.15) проводили за критерієм Фішера. Розрахункове значення критерію Фішера становило  $F^{\delta i \zeta \delta} = 11,178$  при дисперсії неадекватності  $S_{i \hat{a} \hat{a} \hat{a}}^2 = 0,00385$  і дисперсії відтворюваності  $S_y^2 = 0,0003444$ .

Табличне значення критерію Фішера за прийнятого 5%-го рівня значущості, згідно з [47], склало:

$$F^{\delta \hat{a} \hat{a} \hat{a}}(0,05; f_2; f_1) = 19,42,$$

де  $f_2 = 15$  – число ступенів вільності дисперсії неадекватності;

$f_1 = 2$  – число ступенів вільності дисперсії відтворюваності дослідів.

Оскільки  $F^{\delta i \zeta \delta} = 11,178 < F^{\delta \hat{a} \hat{a} \hat{a}}(0,05; f_2; f_1) = 19,42$ , то гіпотеза адекватності рівняння регресії підтверджується.



Рис. 5.3. Реалізація експерименту на озері Зяцьке

Остаточно рівняння регресії із факторами набуло вигляду:

$$Q = 3,17158 - 0,02939 \cdot l + 0,00598 \cdot \alpha - 72,0 \cdot d - 0,00768 \cdot P_i + \\ + 0,05667 \cdot P_i \cdot d + 1,31667 \cdot \alpha \cdot d - 4,27778 \cdot d \cdot l + \\ + 6,6 \cdot 10^{-6} \cdot P_i^2 - 7,6 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^2 + 416,66667 \cdot d^2 + 0,03067 \cdot l^2. \quad (5.16)$$

За отриманим рівнянням регресії (5.16) було побудовано поверхні відгуку та їх двомірні січення (рис.5.4 – 5.7) для відслідкування динаміки зміни продуктивності засобу для добування сапропелю.

Аналіз отриманих результатів показує, що всі досліджувані фактори мають суттєвий вплив на продуктивність засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм. Застосування тиску нагнітання повітря  $P_n < 400$  кПа з використанням малих діаметрів піднімального трубопроводу  $d < 0,055$  м являється не раціональним, оскільки призводить до зниження продуктивності засобу. Збільшення тиску до  $P_n = 500$  кПа за  $d > 0,055$  м призводить до значного зростання продуктивності засобу (рис. 5.4; 5.6). Отже,

раціональне значення тиску нагнітання повітря для підвищення продуктивності засобу повинно бути більшим за  $P_n=400$  кПа, а діаметра піднімального трубопроводу  $d>0,055$  м (рис. 5.6).

Використання кута нахилу твірної конусоподібного корпусу  $\alpha$  понад  $25^\circ$  являється недоцільним. Оскільки із збільшенням  $\alpha$  продуктивність пристрою інтенсивно зростає за значення  $\alpha \approx 22^\circ$ . У подальшому незалежно від діаметра піднімального трубопроводу та тиску нагнітання повітря, вплив даного фактору поступово сповільнюється (рис. 5.6; 5.7). Тому значення кута нахилу твірної конусоподібного корпусу  $\alpha = 25^\circ$  слід вважати раціональним.

Із збільшенням довжини піднімального трубопроводу продуктивність засобу із пневматичним забірним пристроєм зменшується (рис. 5.4; 5.4; 5.7). Тому, із використанням піднімального трубопроводу з довжиною  $l>4,5$  м зменшує ефективність засобу. Але даної довжини достатньо для добування сапропелю з підводних родовищ із мінімальною товщиною водного дзеркала. Зменшення продуктивності  $Q$  через зростання довжини піднімального трубопроводу може бути компенсовано збільшенням тиску нагнітання повітря  $P_n$ , але це в свою чергу приведе до збільшення енергетичних затрат на одиницю добутих покладів.

Для розрахунку окремих параметрів засобу для добування сапропелю запропонована інженерна методика розрахунку додаток Д.

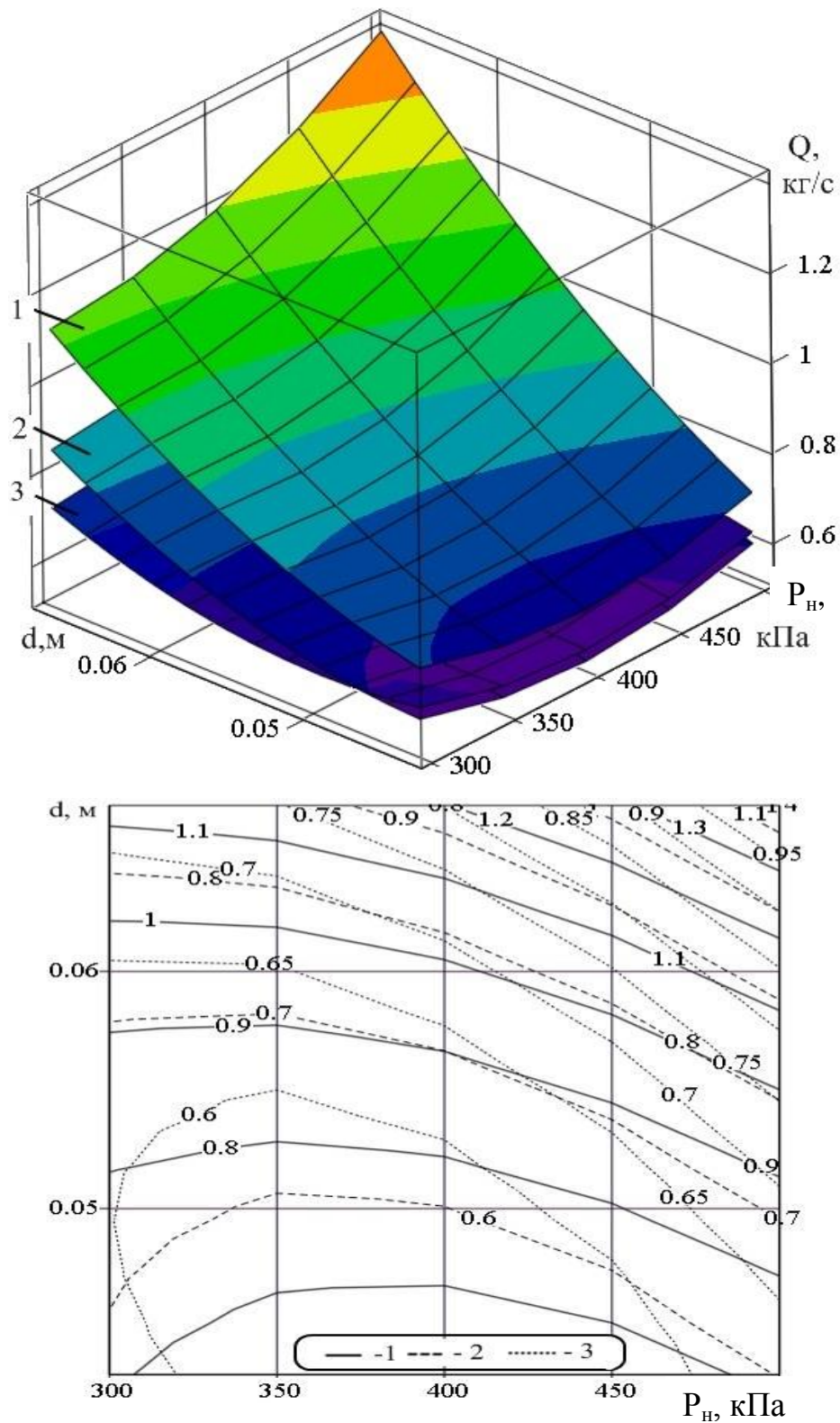


Рис.5.4. Залежність продуктивності засобу  $Q$  від тиску нагнітання повітря  $P_n$  та діаметру підйимального трубопроводу  $d$  при куті нахилу твірної корпусу  $\alpha=25^\circ$  і довжині підйимального трубопроводу 1 –  $l=1,5$  м; 2 –  $l=3$  м; 3 –  $l=4,5$  м



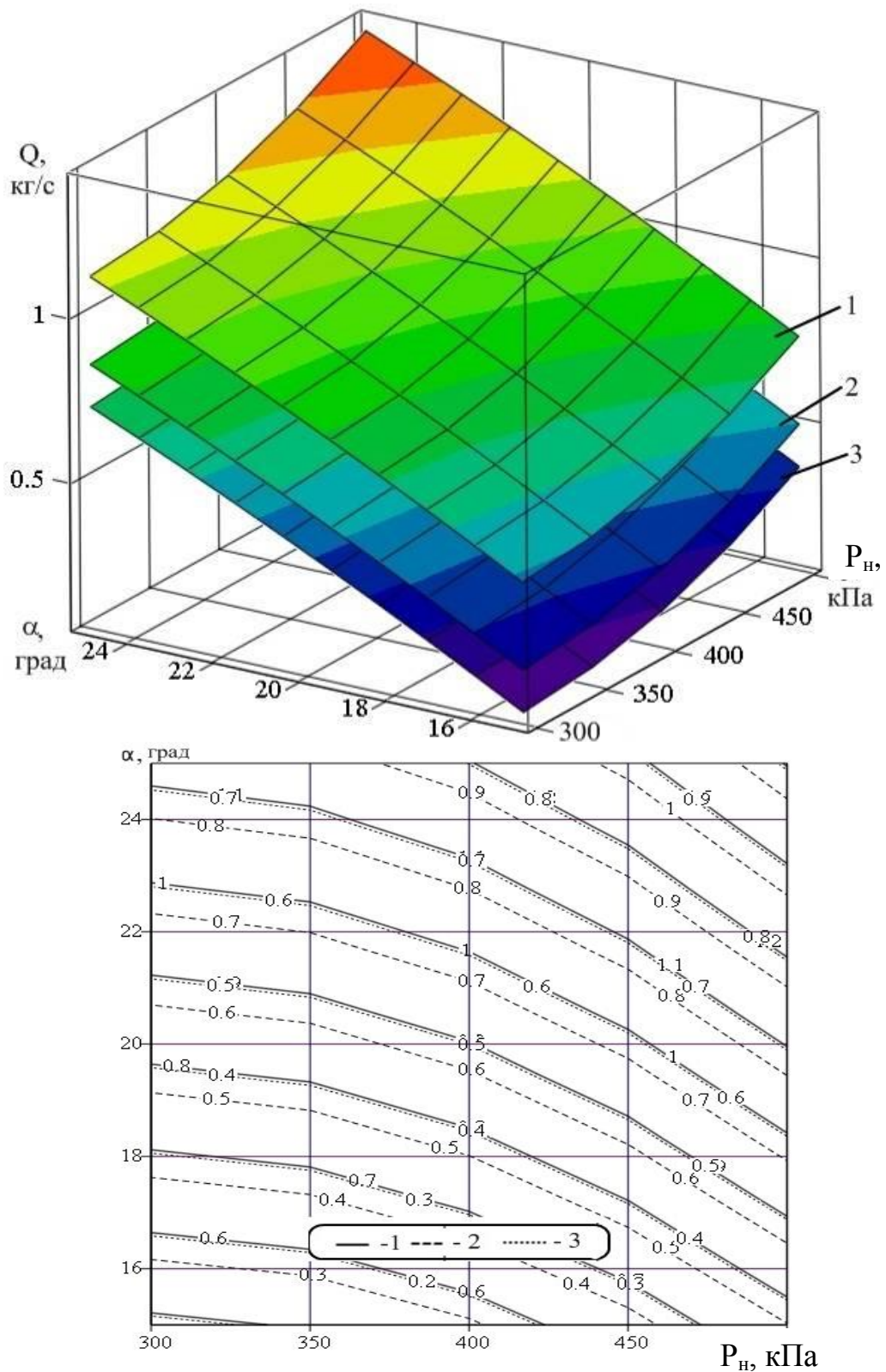


Рис.5.5. Залежність продуктивності засобу  $Q$  від тиску нагнітання повітря  $P_n$  та кута нахилу твірної корпуса  $\alpha$  при діаметрі підйимального трубопроводу  $d=0,067$  м і довжини підйимального трубопроводу 1 –  $l=1,5$  м; 2 –  $l=3$  м; 3 –  $l=4,5$  м



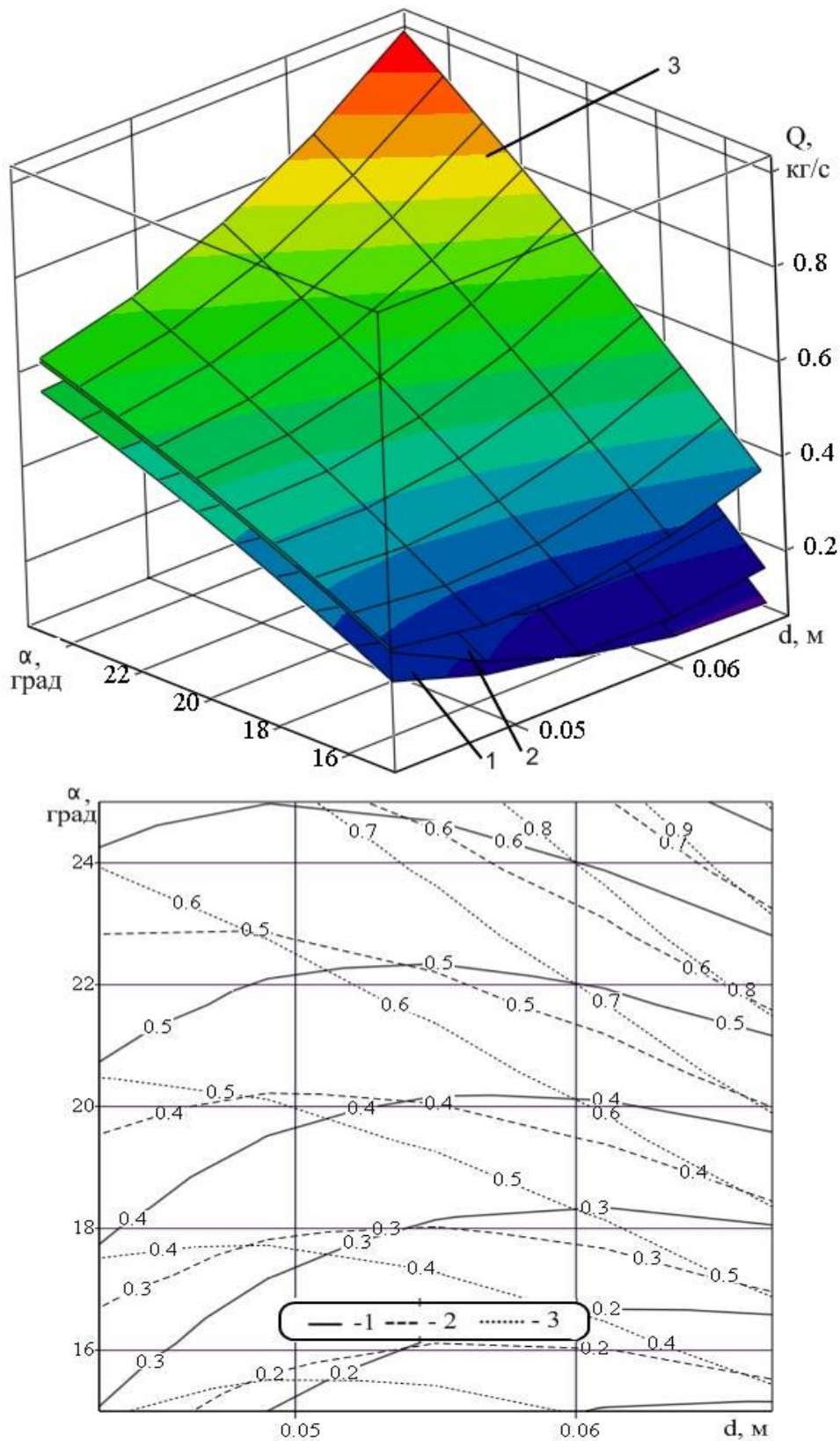


Рис. 5.6. Залежність продуктивності засобу  $Q$  від діаметра підйимального трубопроводу  $d$  та кута нахилу твірної корпуса  $\alpha$  при довжині підйимального трубопроводу  $l=4,5$  м і тиску нагнітання повітря: 1 –  $P_n=300$  кПа; 2 –  $P_n=400$  кПа; 3 –  $P_n=500$  кПа

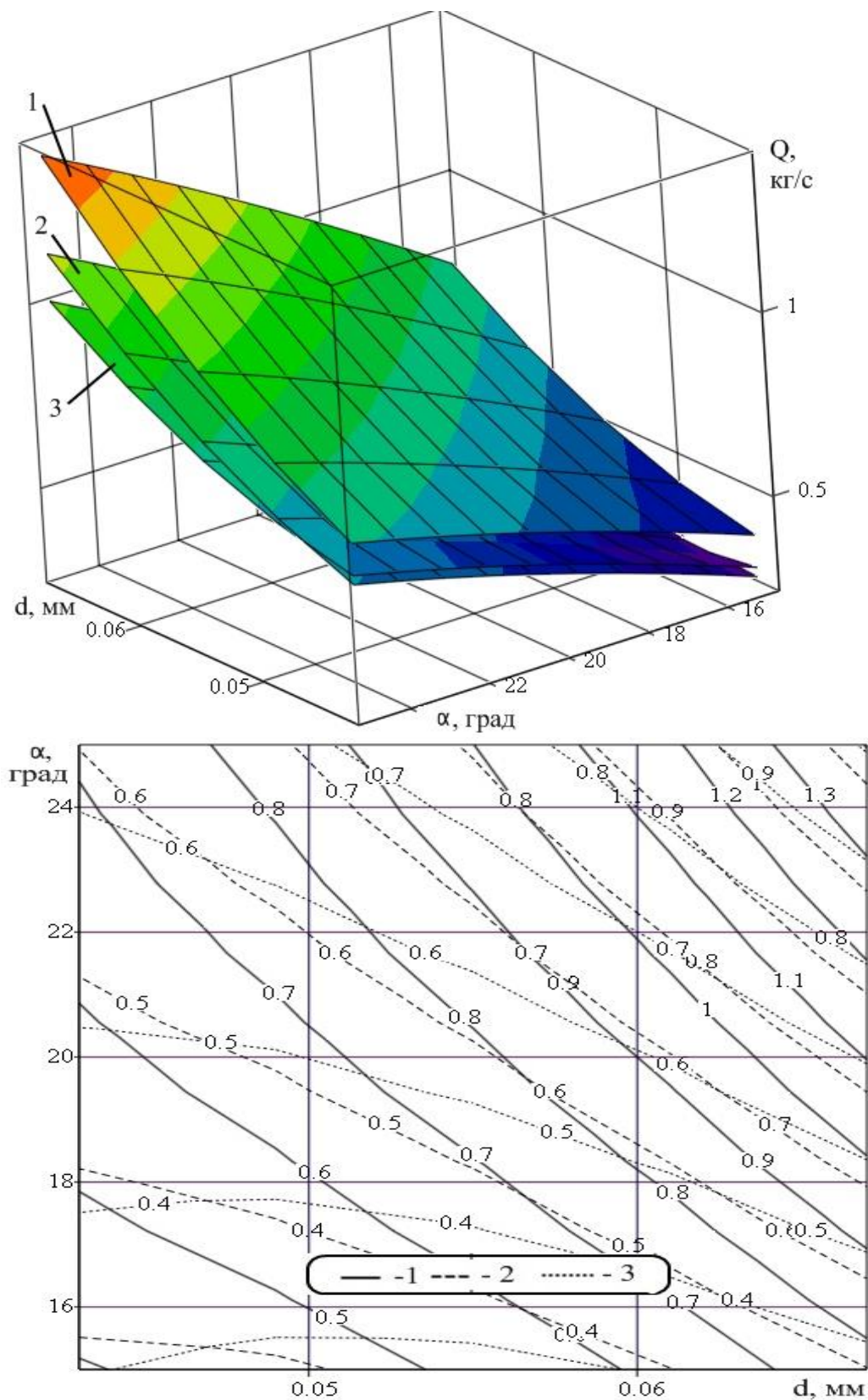


Рис. 5.7. Залежність продуктивності засобу  $Q$  від діаметра підйимального трубопроводу  $d$  та кута нахилу твірної корпусу  $\alpha$  при тиску нагнітання повітря  $P_n=500$  кПа і довжини підйимального трубопроводу: 1 –  $l=1,5$  м; 2 –  $l=3$  м; 3 –  $l=4,5$  м

### 5.3. Розрахунок економічної ефективності

Економічна ефективність процесу добування сапропелю засобом обладнаним розробленим пневматичним забірним пристроєм визначається у порівнянні із пневматичним камерним насосом V 60/10 фірми „Pneuma” для глибинних робіт, що забезпечує добування сапропелів з підводних родовищ, який прийняли за базову розробку. Оскільки пневматичний камерний насос V 60/10 працює у комплексі трьох камер (рис. 1.15), розрахунки проводимо за продуктивністю однієї з них.

Враховуючи зміну цін на комплектуючі матеріали, електроенергію, паливно-мастильні матеріали і зміну нормативів на заробітну плату та відрахування, дані показники можна вважати реальними при розрахунку для умов експлуатації розробленого засобу у складі технологічного обладнання добування сапропелю у заміні базового.

Економічна ефективність визначається для порівнюваних варіантів як різниця зведених витрат на виконання річного обсягу робіт, кількості та якості сільськогосподарської продукції, трудових ресурсів і здійснюється за методикою [124, 125] у наступній послідовності:

1. Виходячи з експлуатаційних показників роботи базового та нового варіантів добувального пристрою, нормативно-довідкових даних, цін на сільськогосподарську техніку, електроенергію та інше, формувалась таблиця вихідних даних для розрахунку економічної ефективності спеціалізованої техніки. Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 5.1, де враховано лише показники, що відносяться до процесу добування сапропелю і впливають на економічну ефективність.

2. Розрахунок економічної ефективності проводився на ПЕОМ з використанням електронних таблиць у середовищі Microsoft Excel. Вихідні дані заносились до електронної таблиці, аналогічної до табл. 5.1.

Отримані результати розрахунку в електронній таблиці програми Microsoft Excel дубльовані у табл. 5.2. Аналіз отриманих результатів вказує на

доцільність використання засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм внаслідок зменшення енергетичних затрат та здешевлення вартості машини.

Таблиця 5.1.

Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності спеціалізованої техніки

Показники	Позначення	Машина	
		Базова	Нова
1	2	3	4
Продуктивність агрегату або машини за годину змінного часу т/год.	$W_{зм}$	20	5
Балансова вартість машини, грн.	$B_m$	80000	14800
Річне завантаження машини, год.	$T_{рм}$	4160	4160
Чисельність виробничого персоналу, чол:			
основного	$L_{осн}$	1	1
допоміжного	$L_{доп}$	2	1
Годинні тарифні ставки, грн./люд.год:			
основного	$t_{осн}$	20	6,75
допоміжного	$t_{доп}$	14	6,75
Коефіцієнт, що враховує доплати:			
основного персоналу	$k_{досн}$	1,1	1,1
допоміжного персоналу	$k_{ддоп}$	1	1
Коефіцієнт відрахувань на реновацію	$a_m$	0,14	0,14
Коефіцієнт відрахувань на поточний ремонт і технічне обслуговування	$\Gamma_{тм}$	0,14	0,14
Коефіцієнт відрахувань на капітальний ремонт	$\Gamma_{км}$	0,021	0,021
Витрата електроенергії, кВт·год/т.	$q$	0,4	0,012
Ціна 1 кВт електроенергії, грн.	$\Pi$	1,58	1,58
Затрати на зберігання машини, що припадають на 1 годину експлуатаційного часу, грн./год.	$Z_{збм}$	0,02	0,02
Нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень	$E$	0,15	
Коефіцієнт гарантії споживачу економічного ефекту	$b$	0,8	
Коефіцієнт переведення оптової ціни в роздрібну	$d$	1,1	

## Показники економічної ефективності

Показники	Машина	
	Базова	Нова
1	2	3
Річне напрацювання, т.	83200	20800
Прямі затрати (грн./т.) на:		
оплату праці	1,1	1,485
паливно-мастильні матеріали і електроенергію	0,632	0,019
технологічне обслуговування, поточний і капітальний ремонт	0,1548	0,1146
реновацію	0,1346	0,0996
інші прямі затрати	0,001	0,004
всього прямих затрат	2,0224	1,7222
Капітальні вкладання, грн./т.	0,9615	0,7115
Приведені затрати, грн./т.	2,1666	1,7222
Річний економічний ефект від експлуатації нової машини, грн.	–	9243,52
Економічний ефект від виробництва і використання за строк служби нової машини, грн.	–	31874,21
Верхня межа ціни нової машини, грн.	–	40586,27
Лімітна ціна нової машини, грн.	–	32469,02
Затрати праці в люд.-год./т	0,05	0,2
Річна економія праці, люд.-год.	-	-
Строк окупності капіталовкладень, роки	–	1,6

Отримані результати розрахунку (табл.5.2) вказують на доцільність використання нової машини, яка дає річну економію грошових засобів на експлуатаційних витратах 9243,52 грн.

#### 5.4. Висновки до розділу 5

1. Запропонований засіб для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм є роботоздатним. Максимальна продуктивність такого пристрою досягає  $Q = 1,3$  кг/с за затрат потужності електричної енергії у 2,5 кВт та робочому тиску повітря  $P_n = 500$  кПа. Наведене максимальне значення продуктивності досягається за довжини піднімального трубопроводу  $l = 1,5$  м. Але для добування покладів із високою концентрацією органічної речовини доцільно використовувати трубопроводи довжиною  $l = 3,5 \dots 4,5$  м. У такому випадку продуктивність засобу складатиме  $Q = 0,9 \dots 1,1$  кг/с за тих же енергетичних затрат.

2. Розрахунок економічної ефективності свідчить про доцільність використання засобу для добування сапропелю із розробленим пневматичним забірним пристроєм. Річний економічний ефект складає 9243,52 грн.

## ЗАГАЛЬНІ 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 забірною пристрою для добування сапропелю, розроблених методів розрахунку його параметрів і режимів роботи дає можливість зменшити енергозатрати на добування сапропелю та зневоднення при отриманні добрив на його основі, що удосконалює технологію їх виробництва.

Дослідження технологічного процесу добування сапропелю із застосуванням пневматичного забірною 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 забірною пристрою. Отримана залежність максимальної теоретичної продуктивності пневматичного забірною 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 забірною 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 –  $\alpha_k=20\dots30^0$ , діаметр вхідного та вихідного отворів –  $D_0=0,3\dots0,4\text{м}$  та  $D_г=0,09\dots0,14\text{м}$  відповідно.

4. Встановлено, що зольність сапропелю озера Зяцьке знаходиться у межах  $A^c=20\dots33\%$ , 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 3м. Тому для досягнення максимального ефекту від добутих покладів слід починати їх розробку із даної глибини.

5. Досліджено, що в'язкість сапропелю вологістю  $W=90\pm1\%$ , зменшується із зростанням швидкості деформацій зсуву у межах  $\eta=135,52\dots1,98\text{Па}\cdot\text{с}$  за гідростатичного тиску  $P_n=200\text{кПа}$ . Особливо значний вплив на в'язкість сапропелю чинить зміна швидкості деформацій зсуву у межах  $u=0,005\dots0,2\text{м/с}$ . 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  $P_n=100\dots300\text{кПа}$ , товщини шару сапропелю вологістю  $W=90\dots85\pm1\%$ , з-під якого ведеться добування  $l=0,7\dots1,3\text{м}$  та довжини піднімального трубопроводу  $h_m=1,0\dots2,0\text{м}$  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  $W=90\dots85\pm1\%$ , із пневматичним забірним пристроєм досягає  $Q=0,9\dots1,1\text{кг/с}$  за затрат потужності електричної енергії у 2,5кВт при робочому тиску повітря  $P_n=500\text{кПа}$ , довжині і діаметрі піднімального трубопроводу відповідно  $h_m=3,5\dots4,5\text{м}$ ,  $d=0,09\dots0,14\text{м}$  та куті нахилу твірної конічного корпусу  $\alpha_k=25^0$ .



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 «Ковельсільмаш». Розрахунковий річний економічний ефект становить 9243,52грн.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. А.с. № 637554 СССР, МКИ F04F 1/20. Эрлифтная установка для перекачивания пульпы / В.Г. Гейер, Г.М. Березинский, А.А. Каплюхин, А.В. Трейгер (СССР). – №2506967/25-06; Заявлено 11.07.77; Опубл. 15.12.78, Бюл. №46.
2. А.с. №1195073 А СССР, МКИ F04F 1/18. Эрлифт / А.В.Гайдар, (СССР). - №3752507/25-06; Заявлено 21.03.84; Опубл. 30.11.85, Бюл. №44.
3. Акимов В.Ф. Измерение расхода газонасыщенной нефти / В.Ф. Акимов. – М.: Недра, 1978. – С. 200.
4. Аністратенко В.О. Математичне планування експериментів в АПК: Навч. Пос. / В.О. Аністратенко, В.Г. Федоров. – К.: Вища шк., 1993. – С. 375.
5. Богусловский Н.М. Псевдоожигение в химической технологии / Н.М. Богусловский, Т. Мелик-Ахназаров. – М.: ГОСИТТИ, 1960 – С. 98.
6. Бодак В.І. Розробка і дослідження механізмів для добування сапропелів: дис. ... кандидата техн. наук: 05.20.01 / Бодак Володимир Іванович. – Луцьк, 1996. – С. 209.
7. Булік Ю.В. Обґрунтування процесу і параметрів механізму для добування сапропелю: дис. ... кандидата техн. наук: 05.05.11 / Булік Юрій Володимирович. – Луцьк, 2005. – С. 135.
8. Вайнсон А.А. Подъемно транспортные машины / А.А. Вайнсон. – М.: Машиностроение, 1989. – С. 563.
9. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Финансы и статистика, 1981. – С. 263.
10. Воларович М.П. Заводская лаборатория / М.П. Воларович. М., 1945. – №10. – С. 18-24.
11. Воларович М.П. Определение естественной радиоактивности торфа, сапропелей и лигнитов / М.П. Воларович, Н.Н. Стипанов, Н.А. Соколов // Труды Московского торфяного института. - Вып. 5. – М., 1957. – С. 160.

12. Волярович М.П. Определение предельного напряжения сдвига торфа методом конического пластометра / М.П. Волярович, С.Н. Маркова // Новые физические методы исследования торфа. – 1960. – С. 61.
13. Гайдукевич О. М. Технологические основы селективной добычи сапропелей естественной влажности: автореферат дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 25.00.22 „Геотехнология (подземная, открытая и строительная)” / О. М. Гайдукевич. – Минск, 2002. – С. 21.
14. Гейер В.Г. Эрлифтные установки: учебное пособие / [В.Г. Гейер, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пащенко ]. – Донецк: ДПИ, 1982. – С. 64.
15. Гидравлические основы скрубберного процесса и теплопередача в скрубберах / И.М. Жаворонков. М.: Гос. изд советская наука, 1944. – С. 224.
16. Грунти України: Властивості генезис, менеджмент родючості: [навчальний посібник] / [В.І. Купчик, В.В. Іваніна, Г.І. Нестеров та ін.]. – К.: Кондор, 2007. – С. 213.
17. Грунтоведение / [ Е.М.Сергеев, Г.А. Голодковская, Р.С. Зиангиров]. – [3-е изд.]. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. – С. 595.
18. Грунтознавство з основами геології / [І.І. Назаренко, С.М.Польчина, Ю.М. Дмитрук і ін.]. – Чернівці: Книги ХХІ, 2006. – С. 504.
19. Гуменский Б.М. Основы физикохимии глинистых грунтов и их использование в строительстве / Б.М. Гуменский. – М. – Л., 1965 – С. 90.
20. Деградація ґрунтів та шляхи підвищення їх родючості / [Я.О. Мольчак, М.М. Мельнійчук, І.В. Андрощук, В.М Заремба]. – Луцьк.: Настир'я, 1998. – С. 230.
21. Дідух В.Ф. Дослідження фізико-механічних властивостей сапропелів / В.Ф. Дідух, Ю.В. Булік, В.В. Грабовець // Сільськогосподарські машини. Зб. наук. ст., вип. 13. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 2005. – С. 90-98.
22. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов. – [5-е изд., доп. и перераб.] – М.: Агропромиздат, 1985. – С. 351
23. .Економічна оцінка спеціалізованої сільськогосподарської техніки.

Методичні рекомендації для дипломного проектування студентів спеціальності 3113 “Механізація сільськогосподарського виробництва”. – Львів: Львівський державний сільськогосподарський інститут, 1994. – С. 27.

24. Зенков Р.Л. Машины непрерывного транспорта / Р.Л. Зенков, И.И. Ивашков, Л.Н. Колобов. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 432.

25. Исследование процесса истечения воздуха через суживающееся сопло [методические указания] / В.И. Ляшков, В.А. Русин. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. тех. ун-та, 2004. – С. 12.

26. Кислов Н.В. Аэродинамика измельченного торфа / Н.В. Кислов; под. ред. Лиштвана И.И. – Минск: Наука и техника, 1987. – С. 175.

27. Кислов Н.В. Основы пневмотранспорта сыпучих торфяных сред / Н.В. Кислов, В.И. Бакшанский, В.М. Вакунов. – Мн.: Наука и техника, 1983. – С. 182.

28. Кислов Н.В. Пневмоуборка торфа из расстила / Н.В. Кислов, В.И. Бакшанский. – Мн.: Наука и техника, 1983. – С. 86.

29. Кислов Н.В. Физические и аэродинамические свойства измельченного торфа / Н.В. Кислов; под. ред. Олейка Ф.А. – Мн: Высшая школа, 1967. – С. 148.

30. Козориз Г.Ф., Пневматический транспорт деревообрабатывающих предприятий / Г.Ф. Козориз, М.: Машиностроение, 1968. – С. 120.

31. Кононенко А.П. Рабочий процесс эрлифта и его моделирование / А.П. Кононенко. – Донецк: ГВУЗ „ДонНТУ”, 2010. – С. 171.

32. Кононенко А.П. Экспериментальное подтверждение влияния вида структуры водовоздушного потока на энергоёмкость эрлифта / А.П. Кононенко, А.Г. Гусак // Вісник. Серія – Технічні науки. – Суми: СДУ, №1 – 2009. – С. 34.

33. Косаревич И.В. Сапропелевые буровые растворы / И.В. Косаревич, Н.Н. Битюков, В.Ш. Шмавонянд; под. ред. Лиштвана И.И. – Мн.: Наука и техника. 1987. – С. 192.

34. Косаревич И.В. Структурообразование в дисперсиях сапропелей / И.В. Косаревич. – Мн.: Наука и техника. 1990. – С. 248.

35. Костюков В.А. Сборник примеров расчета по отоплению и вентиляции / В.А. Костюков. М.: ГСИ, 1962. – С. 200.
36. Кузнецов О.А. Реология пищевых масс: учебное пособие / О.А. Кузнецов, Е.В. Волошин, и др. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. – С. 106.
37. Курзо Б.В. Горно-геологические условия формирования месторождений сапропеля, экологобезопасные технологии их разработки и комплексное использование сапропелевых ресурсов Беларуси: автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук: спец. 25.00.22 „Геотехнология (подземная, открытая и строительная)“ / Б.В. Курзо. - Мн., 2007. – С. 51.
38. Кутателадзе С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. - М.: Энергия, 1976. – 296 с.
39. Лева М. Псевдооживление / Макс Лева; пер. с англ. В.Г. Айштейна. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – С. 400.
40. Лейбензон Л.С. Сборник трудов. Том 4. Гидроаэродинамика. Геофизика / Л.С. Лейбензон. - М.: Изд академии наук СРСР, 1955. – С. 398.
41. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология / В.Д. Ломтадзе. – Л.: Недра, 1984. – С. 511.
42. Лопотко М.З. Озера и сапропель / М.З. Лопотко; под ред. И.И. Лиштвана. – Мн.: Наука и техника, 1978. – С. 88.
43. Лопотко М.З. Сапропели БССР, их добыча и использование / М.З. Лопотко. Мн.: Наука и техника, 1974. – С. 208.
44. Лопотко М.З. Сапропели в сельском хозяйстве / М.З. Лопотко, Г.А. Евдокимова, П.Л. Кузьмицкий. – М.: Наука и техника, 1992. – С. 216.
45. Мачихин Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – С. 216.
46. Машины непрерывного транспорта. Под ред. В.И. Плавинского. М.: Машиностроение, 1969. – С. 720.
47. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алёшкин, П.М. Рощин. – Л.: Колос. Ленингр. Отд-ние, 1980. – С. 168.

48. Методика розрахунку економічного ефекту конструкторської розробки дипломного проекту. Методичні вказівки до обґрунтування економічної частини дипломного проекту для студентів спеціальності 7.090215 “Машини і обладнання сільськогосподарського виробництва” машинобудівного факультету денної і заочної форм навчання / М.С. Шведик, В.І. Ткачик – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 2006. – С. 40.

49. Назаренко І.І. Грунтознавство / Назаренко І.І., Польшина С.М., Нікорич В.А. – Чернівці: Книги ХХІ, 2003. – С. 400.

50. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. II / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.–мат. лит., 1987. – С. 360.

51. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – С. 304.

52. Органические удобрения в интенсивном земледелии / [ В.А.Васильев, Лукьяненко И.И., Минеев ВТ. и др.]. – М.:Колос, 1984. – С. 190.

53. Пат. 15225 Україна, МПК E02F3/88. Пристрій для добування сапропелю / Цизь І.Є., Дідух В.Ф., Шимчук О.П.; заявник і патентовласник ЛНТУ. – № u200512720; Заявл. 28.12.2005; Опубл. 15.06.2006. Бюл. №6. – С. 3.

54. Пат. 2289656 Росийская Федерация, МПК E02F 3/88. Грунтозаборное устройство земснаряда / Арефьев Н.Н., Тарасова О.Н.; заявитель и патентообладатель Арефьев Н.Н., Тарасова О.Н. - № 2004124420/03; Заявл. 10.08.2004; Опубл. 20.12.2006 Бюл. №35. – С. 10.

55. Пат. 2295611 Росийская Федерация, МПК E02F 3/88. Плавающая установка для глубоководного извлечения грунта / Деменьтьев В.А., Казаков О.Е., Кожевников Н.Н., Ялтанец И.М.; заявитель и патентообладатель Деменьтьев В.А. - № 2004132925/03; Заявл. 12.11.2004; Опубл. 20.03.2007 Бюл. №8. – С. 6.

56. Пат. 2298068 Росийская Федерация, МПК E02F 3/88. Комплекс для добычи сапропеля / Тарасов Ю.Д.; заяв. и патентообл. Гос. образов. учрежд. высш. проф. „Санкт - Петербургский гос. горн. Ин - т им. Г.В. Плеханова” –

№ 2005133814/03; Заявл. 01.11.2005; Опубл. 27.04.2007 Бюл. №12. С.8.

57. Пат. 2351714 Російська Федерація, МПК E02F 3/88. Грунтозаборне устройство земснаряда / Арефьев Н.Н.; заявитель и патентообладатель Арефьев Н.Н. – № 2007123380/03; Заявл. 21.06.2007; Опубл. 10.04.2009 Бюл. №10. – 9 с.

58. Пат. 2390612 Російська Федерація, МПК E02F 3/88. Грунтозаборне устройство земснаряда / Арефьев Н.Н.; заяв. и патентообл. Арефьев Н.Н. – № 2008121676/03; Заявл. 28.05.2008; Опубл. 27.05.2010 Бюл. №15. – С. 17.

59. Пат. 2400630 Російська Федерація, МПК E21C 50/00, E02F 3/88. Устройство для подводной разработки горных пород / Кисляков В.Е., Кацук А.В., Корзун О.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное гос. образов. учрежд. высш. профессион. образов. „Сибирский федеральн. ун-т” - № 2009120012/03; Заявл. 26.05.2009; Опубл. 27.09.2010 Бюл. №27. – С. 6.

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

61. Константинов Ю.М. Технічна механіка рідини і газу: Підручник / Ю.М. Константинов, О.О. Гіжа. - К.: Вища школа, 2002. – С. 277.

62. Пат. 41406 Україна, МПК F04F 1/20. Газліфт / Триллер Є.А., Надєєв Є.І., Калиниченко В.В., Ганза А.І., Немцев Е.М.; заявник та патентовласник Держ. вищ. навч. заклад Донецький нац. тех. ун-т. - № u200813274; Заявл. 17.11.2008; Опубл. 25.05.2009 Бюл. №10. – С. 3.

63. Пат. 46197 Україна, МПК E21C50/00. Грунтозабірний пристрій / Бондаренко А.О., Запара Є.С., Франчук В.П. Кухар В.Ю.; заявник та патентовласник Нац. гірн. ун-т. – № 2000052763; заявл. 15.05.2000; Опубл. 15.05.2002. Бюл. №5. – С. 3.

64. Пат. 51204 Україна, МПК E02F3/88. Добувний модуль озерних сапропелів / Хлопецький Р.А., Дідух В.Ф., Шимчук О.П., Суховерхівський А.С.; заявник і патентовласник Луцький нац. техн. ун-т. - № u200913286; Заявл. 21.12.2009; Опубл. 12.07.2010. Бюл. №13. – С. 2.

65. Пат. 51535 Україна, E02F 3/08. Забірний пристрій / Цизь І.Є., Хомич С.М.; заявник і патентовласник Луцький нац. тех. ун-т. – №u200913475; заявл. 24.12.2009 опубл. 26.07.2010, Бюл. №14.

66. Пат. 72008 України, МПК E02F 3/08. Забірний пристрій / Хомич С.М.; заявник і патентовласник Луцький нац. тех. ун-т. – №u201112474; заявл. 24.10.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. №15.

67. Пат. 7202 Україна, МПК E21C50/00, E02F3/12. Грунтозабірний пристрій / Кухар В.Ю., Бондаренко А.О., Запара Є.С., Франчук В.П.; заявник та патентовласник Нац. гірн. ун-т. - № 20041008734; Заявл. 26.10.2004; Опубл. 15.06.2005. Бюл. №6. – С. 3.

68. Пат. 75856 Україна, МПК E02F3/88. Грунтозабірний пристрій / Булгаков Б.Б., Булгаков О.Б., Гуревич Г.О.; заявник і патентовласник Булгаков Б.Б. - № a200508762; Заявл. 14.09.2005; Опубл. 15.05.2006. Бюл. №5. – С. 4.

69. Пат. 86436 Україна, МПК E21C45/00, F04F 1/20. Морський ерліфт / Кириченко Є.О., Шворак В.Г., Євсєєв В.В., Романюков А.В.; заявник та патентовласник Держ. вищ. навч. заклад „Нац. гірн. ун-т”. - № u200703436; Заявл. 29.03.2007; Опубл. 27.04.20.09 Бюл. №8. – С. 3.

70. Пат. 91523 Україна, МПК E21C50/00, E02F3/88. Грунтозабірний пристрій / Бондаренко А.О., Запара Є.С., Франчук В.П.; заявник та патентовласник Нац. гірн. ун-т. - № a200705798; Заявл. 24.05.2007; Опубл. 10.08.2010. Бюл. №15. – С. 2.

71. Пневмотранспортные установки: Справочник. / [Воробьев А.А., Матвеев А.И., Носко Г.С. и др.]; под ред. Б.А. Анниского. – Ленинград: Машиностроение, 1969 – С. 200.

72. Позняк В.С. Некоторые данные по набуханию сапропелей в щелочных средах / В.С Позняк., И.В. Сенько // Известия АН БССР. Серия химические науки. – 1965. – №3 – с 41.

73. Поршневые компрессоры: учебное пособие для студентов вузов обучающихся по специальности «Холодильные и компресорные установки» / Б.С. Фотин, И.Б. Пирумов, И.К. Прилуцкий, П.И. Пластинин; Под общ. ред.



Б.С. Фотина. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1987. – С. 372.

74. Проблемы исследования сапропелей в народном хозяйстве / [И.И. Лиштван, М.З. Лопотко, И.И. Бамбалов и др.]. – Мн.: Наука и техника, 1981. – С. 192.

75. Пышкин В.П. Пневматические перегружатели зерна / В.П. Пышкин. – М.: Заготиздат, 1962. – С. 103.

76. Разумов И.М. Пневногидротранспорт в химической промышленности / И.М. Разумов – М.: Химия, 1979. – С. 248.

77. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов / И.М. Разумов – М.: Химия, 1964. – С. 160.

78. Розенбаун Р.Б. Движение тел в псевдооживленном слое / Р. Розенбаун, О. Тодес. – Л.: Ленинград, 1980. – С. 168.

79. Романков П.Г. Гидравлические процессы химической технологии / П.Г. Романков. – Л.: . Гос. науч.- тех. издат. литературы, 1948. – С. 124.

80. Романков П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии / П.Г. Романков, М.И. Курочкина. – Л.: Химия, 1982. – С. 288.

81. Романков П.Г. Сушка в кипящем слое / П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская. – М.:–Л.: Химия, 1964. – С. 288.

82. Романков П.Г. Сушка во взвешенном состоянии: конструкция, теория, расчет / П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская. – Л.: Химия, 1979. – С. 272.

83. Рубинштейн А.Я. Интенсивность сапропеленакопления в голоцене на территории СССР / А.Я. Рубинштейн // Исследование торфяных месторождений. – Калинин, 1980. – С. 58-66.

84. Сапропелевые удобрения / [Лопотом. М.З., Евдокимова Г.А., Кузьмицкий П.Л., Букач О.М.]; под ред. А.С. Мееровского. – Мн.: Наука и техника, 1983. – С. 119.

85. Семенский Е.П. Технический анализ торфа / Е.П. Семенский – М.: Недра, 1966. – С. 232.

86. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт (основы расчета ) / А.Е. Смолдырев. – [изд. 3-е перероб. и доп.]. – М.: Недра, 1980. – С. 295.

87. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт (основы расчета) / А.Е. Смолдырев. – М.: Гос- гор. тех. издат., 1961. – С. 286.
88. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов. – М.: Машиностроение, 1973. – С. 208.
89. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов. – [изд. 2-е перераб. и доп.]. – М.: машиностроение, 1989. – С. 256.
90. Специальное оборудование землесосов и многочерпаковых земснарядов // Сборник научных трудов; под. ред. Лукина Н.В. – Горький: Горьковский институт инженеров водного транспорта, Выпуск 207 – 1984. – С. 76.
91. Спиваковский А.О. Конвейерные установки / А.О. Спиваковский. – Харьков-Киев: Гос.-тех.-науч. издательство Украины, 1935. – С. 508.
92. Спиваковский А.О. Транспортирующие машины / А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 504.
93. Страхович К.И. Механика вязкой жидкости. 1 общая часть / К.И. Страхович. – Л.: изд. Ленинградского государственного университета, 1940 – С. 200.
94. Сукач М.К. Ерліфтно-землесосний комплекс для видобування сапропелів / М.К. Сукач, О.Д. Новиков // Гірн., буд., дор. та меліорат. машини. – Вип. 49. – 1995. – С. 9-16.
95. Сукач М.К. Основні шляхи удосконалення ерліфтної установки для розробки підводних ґрунтів / М.К. Сукач, В.М. Чередник // Гірн., буд., дор. та меліорат. машини. – 2007. – Вип. 69. – С. 26-33.
96. Сукач М.К. Рабочие процессы глубоководных машин / М.К. Сукач. – К.: Наукова думка, 2004. – С. 364.
97. Сукач М.К. Разработка глубоководных грунтов / М.К. Сукач. – К.: Наукова думка, 1998. – С. 348.

98. Сукач М.К. Установка для транспортування ґрунту в акваторіях / М.К. Сукач, В.М. Чередник // Гірн., буд., дор. та меліорат. машини. – 2010. – Вип. 75. – С. 57-61.

99. Технические характеристики и принципы работы ПНК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.pneuma.lv/tehn\\_har.html](http://www.pneuma.lv/tehn_har.html). – Назва з титул. екрана.

100. Тодос О.М. Апараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / О.М. Тодос, О.Б. Цытович. – Л.: Химия, 1981. – С. 296.

101. Томин Е.Д. Сапропель, его добыча и использование в сельском хозяйстве / Е.Д. Томин, А.И. Фомин. – Ярославль: Верхневолжское книжное изд., 1964. – С. 104.

102. Труды Всесоюзного научно-исследовательского института подъемно-транспортного машиностроения ВНИИПТМАШ [Методика расчета установок пневматического транспорта. Пневмопочта]. – Выпуск 2 (24). – М., 1962. – С. 130.

103. Физико-механические свойства растений, ґрунтов и удобрений. Методы испытаний, приборы, характеристики. – М.: Колос, 1970. – С. 424.

104. Фомин А. Н. Технология добычи местных удобрений / А.Н. Фомин. – М.: Высшая школа, 1969. – С. 296.

105. Фролов А.Г. Основы транспорта сыпучих материалов по трубам без несущей среды / А.Г. Фролов. – М.: Наука. 1966. – С. 118.

106. Хайліс Г.А. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин / Г.А.Хайліс, Д.М.Коновалюк. – К.: НМК ВО, 1992. – С. 320.

107. Харин А.И. Гидромеханизация земляных работ в строительстве / А.И. Харин, М.Ф. Новиков. – М.: Стройиздат, 1989. – С. 192.

108. Химический состав сапропелей Латвийской ССР и характеристика некоторых месторождений / [Вимба Б., Лапса Э., Бракш Н. и др.] // Доклады к 8 международному конгрессу почвоведов. – Елгава, 1964. – С. 122...135.

109. Хомич С.М. Дослідження забірною пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич, І.Є. Цизь // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. – Вип. 18. – Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2009. – С. 499-503.

110. 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: Р.-в. в. ЛНТУ, 2013. – С. 404-412.

111. Хомич С.М. Дослідження пневматичного забірною пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич, І.Є. Цизь / Тези ХХІІІ-ої науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу "Актуальні проблеми та перспективи науки і виробництва" (технічний напрям). – Луцьк: Навчально-науковий відділ Луцького НТУ, 2008. – С. 160-161.

112. 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: КНТУ, 2012. – С. 147-152.

113. Хомич С.М. Обґрунтування теоретичної продуктивності пневматичного (ерліфтного) забірною пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич // Промислова гідравліка і пневматика. Вип. 3(37). Вінниця: Вінницький НАУ – 2012. – С. 95-96.

114. Хомич С.М. Порівняльна ефективність пневматичних пристроїв для добування озерних сапропелів / С.М. Хомич, І.Є. Цизь // Матеріали ІХ-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки, вип. 1. – Кіровоград: КНТУ, 2013. – С. 50-52.

115. Хомич С.М. Результати експериментальних досліджень робочого процесу пневматичного забірною пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич // Матеріали ХХ міжнародної науково-технічної конференції „Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві” та VII Всеукраїнської конференції-семінару, докторантів і здобувачів у галузі аграрної інженерії. – Глеваха, 2012. – С. 130-131.

116. Хомич С.М. Удосконалення технологій добування сапропелів / С.М. Хомич // Актуальні проблеми розвитку регіональних АПК: матеріали Між нар. наук.-практ. конф. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2011. – С. 254-255.

117. 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. – Том. II – Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2011. – С. 166-172.

118. Хомич С.М. Дослідження продуктивності пневматичного забірною пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич, І.Є. Цизь // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. статей. - Вип. 20. – Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2010. – С. 355-361.

119. Хохлов В.И. Применение сапропелей на удобрение / В.И. Хохлов, А.И. Фомин, Н.А. Шилова. – М.: Россельхозиздат, 1986. – С. 164.

120. Христианович С.А. Прикладная газовая динамика Христианович С.А., Гальперин В.Г., Миллионщиков М.Д., Симонов Л.А. – М., 1948. – С. 148.

121. Хьюитт Дж. Кольцевые двухфазные течения / Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н.; пер. с англ. – М.: Энергия, 1974. – С. 408.

122. 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: Н.-н. в. ЛНТУ, 2012. – С. 146-147.

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

124. Цизь І.Є. Результати експериментальних досліджень робочого процесу пневматичного забірною 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: Н.-н. в ЛНТУ, 2010. – С. 176-177.

125. Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Госстройиздат, 1973. – С. 272.

126. Чаповский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов / Е.Г. Чаповский. – М.: Недра 1975. – С. 304.

127. Чураев Н.В. Дисперсный анализ при помощи весового автоматического седементометра / Н.В. Чураев, А.М. Миронов // . Коллоидный журнал. – 1967. – Т. 29. – №1.

128. Шапошников М.А. Прочность глинистого сапропеля / М.А. Шапошников // Основания фундаменты и механика грунтов. – 1969. – №1.

129. Шевчук М.Й. Агрохімічні та агроекологічні основи добування і використання озерних родовищ сапропелів в сільському господарстві: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра с.-г. наук: спец. 06.00.04 „Агрохімія” / М. Й. Шевчук. – К., 1997. –С. 45.

130. Шевчук М.Й. Сапропелі України: запаси якості та перспективи використання / М.Й. Шевчук. – Луцьк: Надстир'я, 1996. – С. 383.

131. Шимчук О.П. Обґрунтування параметрів модуля для добування озерних сапропелів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спеціальність 05.05.11 „Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва”/ О.П. Шимчук. – Тернопіль, 2009. – С. 23.

132. Muller H.G. An introduction to food rheology / H.G. Muller. – London, 1973. – P. 148.

133. Report Rothamsted experimental station for 1963. – Harpenden, 1964. – P. 318.

134. Sorterberg A. Yield and phosphorus uptake / A. Sorterberg // New ideas and Technologies in utilization peatlands and peat. – Poznan, 1976, V.5. – P. 7-14.

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

**ДОДАТКИ**

## Додаток А

```

> restart;

#Універсальна газова стала
R:=8.31:
#Молярна маса повітря
mu:=29e-3:
#Абсолютна температура бульбашки
T:=293:
#Атмосферний тиск
pa:=1.013e5:
#Пришвидження вільного падіння
g:=9.81:
#В'язкість рідини
eta:=0.001:
#Густина рідини
rho:=1.0e3:
#Показник адиабати
k:=1.4:

#Глибина, з якої стартує бульбашка
H:=0.5:
#Кут нахилу сопла (радіани) до горизонталі
alpha:=evalf(45*Pi/180):
#Тиск на виході з отвору
pe:=pa+rho*g*H:
#Тиск подачі
p:=2e5+pa:

#Швидкість вильоту за швидкістю у найішущому січешні струмені
n:=1.405:
ve0:=sqrt(2*n/(n-1)*p/rho*(1-(pe/p)^(n/(n-1))));

#Проекції вектора початкової швидкості на осі координат
vx0:=ve0*cos(alpha):
vy0:=ve0*sin(alpha):
#Радіус бульбашки при атмосферному тиску
r:=0.047e-1:
#Об'єм бульки при атм. тиску, обчислюється через радіус
V0:=evalf(4/3*Pi*r^3):

#Далі йде формування системи рівнянь

#Швидкість бульки
v:=sqrt(diff(x(t),t)^2+diff(y(t),t)^2):
#В'язкість рідини
залежно від швидкості потоку

#Тиск, залежно від глибини і швидкості, обчислений за формулою Бернуллі
p:=pa+rho*g*(H-y(t))+rho*v^2/2:
#Об'єм бульки за формулою Клапейрона
V:=mu/mu/p*R*T:
#Сила Архімеда
Fa:=rho*g*V:
#Радіус бульки на глибині
a:=(3*V/4/Pi)^(1/3):

```



```

#Компоненти сили Стокса
Fsx:=-6*Pi*eta*a*diff(x(t),t):
Fsy:=-6*Pi*eta*a*diff(y(t),t):

#Праві частини диф. рівнянь
Rx:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsx/m)):
Ry:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsy/m))+Fa/m-g:

#Система диф. рівнянь
SYS:=diff(x(t),t$2)=Rx, diff(y(t),t$2)=Ry:
#Початкові умови
IC:=x(0)=0, y(0)=0, D(x)(0)=vx0, D(y)(0)=vy0:

#Розв'язування системи диф. рівнянь
F:=dsolve({SYS,IC},{x(t),y(t)},numeric,method=rosenbrock,
listprocedure):

X:=subs(F,x(t)):
Y:=subs(F,y(t)):

#Побудова графіків траєкторії бульки
A:=plot([X(t),Y(t),t=0..0.015], style = line,color=green,
thickness = 3):
                                ve0:=21.51395878

#Тиск подачі
p:=2e5+pa:

#Швидкість вильоту за швидкістю у найширшому сеченні струменя
n:=1.405:
ve0:=sqrt(2*n/(n-1)*p/rho*(1-(pe/p)^(n/(n-1)))):

#Проекції вектора початкової швидкості на осі координат
vx0:=ve0*cos(alpha):
vy0:=ve0*sin(alpha):
#Радіус бульбашки при атмосферному тиску
r:=0.032e-1:
#Об'єм бульки при атм. тиску, обчислюється через радіус
V0:=evalf(4/3*Pi*r^3):

#Далі йде формування системи рівнянь

#Швидкість бульки
v:=sqrt(diff(x(t),t)^2+diff(y(t),t)^2):
                                #В'язкість радни
залежно від швидкості потоку

#Тиск, залежно від глибини і швидкості, обчислений за фор.
Бернуллі
p:=pa+rho*g*(H-y(t))+rho*v^2/2:
#Об'єм бульки за формулою Клапейрона
V:=m/mu/p*R*T:
#Сила Архімеда
Fa:=rho*g*V:
#Радіус бульки на глибині

```

```

a:=(3*V/4/Pi)^(1/3):
#Компоненти сили Стокса
Fsx:=-6*Pi*eta*a*diff(x(t),t):
Fsy:=-6*Pi*eta*a*diff(y(t),t):

#Праві частини диф. рівнянь
Rx:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsx/m)):
Ry:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsy/m))+Fa/m-g:

#Система диф. рівнянь
SYS:=diff(x(t),t$2)=Rx, diff(y(t),t$2)=Ry:
#Початкові умови
IC:=x(0)=0, y(0)=0, D(x)(0)=vx0, D(y)(0)=vy0:

#Розв'язування системи диф.рівнянь
F:=dsolve({SYS,IC},{x(t),y(t)},numeric,method=rosenbrock,options={listprocedure}):

X:=subs(F,x(t)):
Y:=subs(F,y(t)):

#Побудова графіків траєкторії бульки
B:=plot([X(t),Y(t),t=0..0.02], style = line,color=green,
thickness = 2):
ve0:=21.51395878

>
#Тиск подачі
p:=5e5+pa:

#Швидкість вильоту за швидкістю у найіущому сівення струмені
n:=1.405:
ve0:=sqrt(2*n/(n-1)*p/rho*(1-(pe/p))^(n/(n-1)));

#Проекції вектора початкової швидкості на осі координат
vx0:=ve0*cos(alpha):
vy0:=ve0*sin(alpha):
#Радіус бульбашки при атмосферному тиску
r:=0.0325e-1:
#Об'єм бульки при атм. тиску, обчислюється через радіус
V0:=evalf(4/3*Pi*r^3):

#Далі йде формування системи рівнянь

#Швидкість бульки
v:=sqrt(diff(x(t),t)^2+diff(y(t),t)^2):
#В'язкість рідини

залежно від швидкості потоку

#Тиск, залежно від глибини і швидкості, обчислений за фор.
Бернуллі
p:=pa+rho*g*(H-y(t))+rho*v^2/2:
#Об'єм бульки за формулою Клапейрона
V:=m/mu/p*R*T:
#Сила Архімеда
Fa:=rho*g*V:

```

```

#Радіус бульки на глибині
a:=(3*V/4/Pi)^(1/3):
#Компоненти сили Стокса
Fsx:=-6*Pi*eta*a*diff(x(t),t):
Fsy:=-6*Pi*eta*a*diff(y(t),t):

#Праві частини диф. рівнянь
Rx:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsx/a)):
Ry:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsy/a))+Fa/m-g:

#Система диф. рівнянь
SYS:=diff(x(t),t$2)=Rx, diff(y(t),t$2)=Ry:
#Початкові умови
IC:=x(0)=0, y(0)=0, D(x)(0)=vx0, D(y)(0)=vy0:

#Розв'язування системи диф.рівнянь
F:=dsolve({SYS,IC},{x(t),y(t)},numeric,method=rosenbrack,
listprocedure):

X:=subs(F,x(t)):
Y:=subs(F,y(t)):

# Побудова графіків траєкторії бульки
A2:=plot([X(t),Y(t),t=0..0.015], style = line,color=black,
thickness = 3):
                                ve0:=46.10723720
>
#Тиск подачі
p:=5e5+pa:
#Швидкість вильоту за швидкістю у найвищому сеченні струменя
n:=1.405:
ve0:=sqrt(2*n/(n-1)*p/rho*(1-(pe/p)^(n/(n-1)))):
#Проекції вектора початкової швидкості на осі координат
vx0:=ve0*cos(alpha):
vy0:=ve0*sin(alpha):
#Радіус бульбашки при атмосферному тиску
r:=0.024e-1:
#Об'єм бульки при атм. тиску, обчислюється через радіус
V0:=evalf(4/3*Pi*r^3):
#Далі йде формування системи рівнянь
#Швидкість бульки
v:=sqrt(diff(x(t),t)^2+diff(y(t),t)^2):
                                #В'язкість рідкого
залежно від швидкості потоку
#Тиск, залежно від глибини і швидкості, обчислений за фор-
Бернуллі
p:=pa+rho*g*(H-y(t))+rho*v^2/2:
#Об'єм бульки за формулою Клапейрона
V:=m/mu/p*R*T:
#Сила Архімеда

```

```

Fa:=rho*g*V:
#Радіус бульки на глибині
a:=(3*V/4/Pi)^(1/3):
#Компоненти сили Стокса
Fsx:=-6*Pi*eta*a*diff(x(t),t):
Fsy:=-6*Pi*eta*a*diff(y(t),t):

#Праві частини диф. рівнянь
Rx:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsx/m)):
Ry:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsy/m))+Fa/m-g:

#Система диф. рівнянь
SYS:=diff(x(t),t$2)=Rx, diff(y(t),t$2)=Ry:
#Початкові умови
IC:=x(0)=0, y(0)=0, D(x)(0)=vx0, D(y)(0)=vy0:

#Розв'язування системи диф.рівнянь
F:=dsolve({SYS,IC},{x(t),y(t)},numeric,method=rosenbrock,as
listprocedure):

X:=subs(F,x(t)):
Y:=subs(F,y(t)):

#Побудова графіків траєкторії бульки
E2:=plot([X(t),Y(t),t=0..0.021], style = line,color=black,
thickness = 2):

ve0:=46.10723720

#Тиск подачі
p:=3e5+pa:

#Швидкість вильоту за швидкістю у найіущому сичення сарума
n:=1.405:
ve0:=sqrt(2*n/(n-1)*p/rho*(1-(pe/p))^(n/(n-1))):

#Проекції вектора початкової швидкості на осі координат
vx0:=ve0*cos(alpha):
vy0:=ve0*sin(alpha):
#Радіус бульбашки при атмосферному тиску
r:=0.040e-1:
#Об'єм бульки при атм. тиску, обчислюється через радіус
V0:=evalf(4/3*Pi*r^3):

#Далі йде формування системи рівнянь

#Швидкість бульки
v:=sqrt(diff(x(t),t)^2+diff(y(t),t)^2):
#В'язкість рідин
залежно від швидкості потоку

#Тиск, залежно від глибини і швидкості, обчислений за форм.
Бернуллі
p:=pa+rho*g*(H-y(t))+rho*v^2/2:
#Об'єм бульки за формулою Клапейрона
V:=m/mu/p*R*T:

```

```

#Сила Архімеда
Fa:=rho*g*V:
#Радіус бульки на глибині
a:=(3*V/4/Pi)^(1/3):
#Компоненти сили Стокса
Fsx:=-6*Pi*eta*a*diff(x(t),t):
Fsy:=-6*Pi*eta*a*diff(y(t),t):

#Праві частини диф. рівнянь
Rx:=simplify(subs(m=mu*ra*V0/R/T,Fsx/m)):
Ry:=simplify(subs(m=mu*ra*V0/R/T,Fsy/m))+Fa/m-g:

#Система диф. рівнянь
SYS:=diff(x(t),t$2)=Rx, diff(y(t),t$2)=Ry:
#Початкові умови
IC:=x(0)=0, y(0)=0, D(x)(0)=vx0, D(y)(0)=vy0:

#Розв'язування системи диф. рівнянь
F:=dsolve({SYS,IC},{x(t),y(t)},numeric,method=rosenbrock,
listprocedure):

X:=subs(F,x(t)):
Y:=subs(F,y(t)):

#Побудова графіків траєкторії бульки
A3:=plot([X(t),Y(t),t=0..0.015], style = line,color=brown,
thickness = 3):
ve0:=30.95870143

#Тиск подачі
p:=3e5+pa:

#Швидкість вильоту за швидкістю у найширшому сеченні струменя
n:=1.405:
ve0:=sqrt(2*n/(n-1)*p/rho*(1-(pe/p))^(n/(n-1)));

#Проекції вектора початкової швидкості на осі координат
vx0:=ve0*cos(alpha):
vy0:=ve0*sin(alpha):
#Радіус бульбашки при атмосферному тиску
r:=0.028e-1:
#Об'єм бульки при атм. тиску, обчислюється через радіус
V0:=evalf(4/3*Pi*r^3):

#Далі йде формування системи рівнянь

#Швидкість бульки
v:=sqrt(diff(x(t),t)^2+diff(y(t),t)^2):
#В'язкість рідкого
#залежно від швидкості потоку

#Тиск, залежно від глибини і швидкості, обчислений за формулою
Бернуллі
p:=pa+rho*g*(H-y(t))+rho*v^2/2:
#Об'єм бульки за формулою Клапейрона

```

```

V:=m/mu/p*R*T:
#Сила Архімеда
Fa:=rho*g*V:
#Радіус бульки на глибині
a:=(3*V/4/Pi)^(1/3):
#Компоненти сили Стокса
Fsx:=-6*Pi*eta*a*diff(x(t),t):
Fsy:=-6*Pi*eta*a*diff(y(t),t):

#Праві частини диф. рівнянь
Rx:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsx/m)):
Ry:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsy/m))+Fa/m-g:

#Система диф. рівнянь
SYS:=diff(x(t),t$2)=Rx, diff(y(t),t$2)=Ry:
#Початкові умови
IC:=x(0)=0, y(0)=0, D(x)(0)=vx0, D(y)(0)=vy0:

#Розв'язування системи диф. рівнянь
F:=dsolve({SYS,IC},{x(t),y(t)},numeric,method=rosenbrock,
listprocedure):

X:=subs(F,x(t)):
Y:=subs(F,y(t)):

#Нобудова графіків траєкторії бульки
E3:=plot([X(t),Y(t),t=0..0.02], style = line, color=red,
thickness = 2):
                                ve0:= 30.95870143

#Тиск подачі
p:=4e5+pa:

#Швидкість вильоту за швидкістю у найкращому січченні сопла
n:=1.405:
ve0:=sqrt(2*n/(n-1)*p/rho*(1-(pe/p)^(n/(n-1)))):

#Проекції вектора початкової швидкості на осі координат
vx0:=ve0*cos(alpha):
vy0:=ve0*sin(alpha):
#Радіус бульбашки при атмосферному тиску
r:=0.035e-1:
#Об'єм бульки при атм. тиску, обчислюється через радіус
V0:=evalf(4/3*Pi*r^3):

#Далі йде формування системи рівнянь

#Швидкість бульки
v:=sqrt(diff(x(t),t)^2+diff(y(t),t)^2):
                                #В'язкість бульки
залежно від швидкості потоку

#Тиск, залежно від глибини і швидкості, обчислений за фор-
Бернуллі
p:=pa+rho*g*(H-y(t))+rho*v^2/2:

```

```

#Об'єм бульки за формулою Клапейрона
V:=m/mu/p*R*T:
#Сила Архімеда
Fa:=rho*g*V:
#Радіус бульки на глибині
a:=(3*V/4/Pi)^(1/3):
#Компоненти сили Стокса
Fsx:=-6*Pi*eta*a*diff(x(t),t):
Fsy:=-6*Pi*eta*a*diff(y(t),t):

#Праві частини диф. рівнянь
R:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsx/m)):
Ry:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsy/m))+Fa/m-g:

#Система диф. рівнянь
SYS:=diff(x(t),t$2)=Rx, diff(y(t),t$2)=Ry:
#Початкові умови
IC:=x(0)=0, y(0)=0, D(x)(0)=vx0, D(y)(0)=vy0:

#Розв'язування системи диф. рівнянь
F:=dsolve({SYS,IC},{x(t),y(t)},numeric,method=rosenbrock,
listprocedure):
X:=subs(F,x(t)):
Y:=subs(F,y(t)):

#Побудова графіків траєкторії бульки
Ad:=plot([X(t),Y(t),t=0..0.015], style = line,color=blue,
thickness = 2):
                                ve0:= 39.02355417

>
#Тиск подачі
p:=4e5+pa:
#Швидкість вильоту за швидкістю у найширшому сеченні струменя
n:=1.405:
ve0:=sqrt(2*n/(n-1)*p/rho*(1-(pe/p)^(n/(n-1)))):
#Проекції вектора початкової швидкості на осі координат
vx0:=ve0*cos(alpha):
vy0:=ve0*sin(alpha):
#Радіус бульбашки при атмосферному тиску
r:=0.025e-1:
#Об'єм бульки при атм. тиску, обчислюється через радіус
V0:=evalf(4/3*Pi*r^3):

#Далі йде формування системи рівнянь

#Швидкість бульки
v:=sqrt(diff(x(t),t)^2+diff(y(t),t)^2):
                                #В'язкість рідини
залежно від швидкості потоку

#Тиск, залежно від глибини і швидкості, обчислюється за ф-ою
Бернуллі

```

```

p:=pa+rho*g*(H-y(t))+rho*v^2/2:
#Об'єм бульки за формулою Клапейрона
V:=m/mu/p*R*T:
#Сила Архімеда
Fa:=-rho*g*V:
#Радіус бульки на глибині
a:=(3*V/4/Pi)^(1/3):
#Компоненти сили Стокса
Fsx:=-6*Pi*eta*a*diff(x(t),t):
Fsy:=-6*Pi*eta*a*diff(y(t),t):

#Праві частини диф. рівнянь
Rx:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsx/m)):
Ry:=simplify(subs(m=mu*pa*V0/R/T,Fsy/m))+Fa/m-g:

#Система диф. рівнянь
SYS:=diff(x(t),t$2)=Rx, diff(y(t),t$2)=Ry:
#Початкові умови
IC:=x(0)=0, y(0)=0, D(x)(0)=vx0, D(y)(0)=vy0:

#Розв'язування системи диф. рівнянь
F:=dsolve({SYS,IC},{x(t),y(t)},numeric,method=rosenbrock,
listprocedure):

X:=subs(F,x(t)):
Y:=subs(F,y(t)):

#Побудова графіків траєкторії бульки
B4:=plot([X(t),Y(t),t=0..0.020], style = line,color=blue,
thickness = 2):
ve0:=39.02355417

```

```

> with(plots):
> display({A, B, A2, B2, A3, B3, A4, B4, })

```





Таблиця Б.3. Планування експерименту і черговість проведення дослідів

Черговість проведення дослідів	Фактори		
	$P$ , кПа	$h$ , м	$l$ , м
1	300	1,3	1,5
2	100	1,3	1,5
3	300	0,7	1,5
4	100	0,7	1,5
5	300	1,0	2,0
6	100	1,0	2,0
7	300	1,0	1,0
8	100	1,0	1,0
9	200	1,3	2,0
10	200	0,7	2,0
11	200	1,3	1,0
12	200	0,7	1,0
13	200	1,0	2,0
14	200	1,0	2,0
15	200	1,0	2,0



Таблиця В. 2 – Фактори і рівні варіювання

Рівні варіювання	Фактори			
	Тиск $P_n$ , кПа	Кут нахилу твірної корпусу $\alpha_k$ , град	Діаметр транспортуючого трубопроводу, $d$ , м	Довжина транспортуючого трубопроводу, $l$ , м
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Верхній (+1)	500	25	0,067	4,5
Нульовий (0)	400	20	0,055	3,0
Нижній (-1)	300	15	0,043	1,5
Інтервал варіювання, $\varepsilon$	100	5	0,012	1,5

Таблиця В. 3. – Планування експерименту і черговість проведення дослідів

Черговість проведення дослідів	Фактори			
	$P_n$ , кПа	$\alpha_k$ , град.	$d$ , м	$l$ , м
14	500	25	0,055	3,0
4	300	25	0,055	3,0
5	500	15	0,055	3,0
2	300	15	0,055	3,0
11	400	20	0,067	4,5
8	400	20	0,043	4,5
6	400	20	0,067	1,5
1	400	20	0,043	1,5
19	500	20	0,055	4,5
25	300	20	0,055	4,5
21	500	20	0,055	1,5
3	300	20	0,055	1,5
24	400	25	0,067	3,0
7	400	15	0,067	3,0
16	400	25	0,043	3,0
22	400	15	0,043	3,0
20	500	20	0,067	3,0
13	300	20	0,067	3,0
15	500	20	0,043	3,0
9	300	20	0,043	3,0
23	400	25	0,055	4,5
12	400	15	0,055	4,5
17	400	25	0,055	1,5
25	400	15	0,055	1,5
10	400	20	0,055	3,0
18	400	20	0,055	3,0
26	400	20	0,055	3,0

Таблиця В. 4 – Експериментальні значення випробування засобу для добування сапропелю

Кут нахилу твірної кор- усу $\alpha_k$ , град.	Діаметр трубопроводу $d$ , м	Довжина трубопроводу	Глибина добування $h$ , м	Тиск $P_n$ , кПа	Продук- тивність $Q$ , кг\хв	Тиск $P_n$ , кПа	Продук- тивність $Q$ , кг\хв	Тиск $P_n$ , кПа	Продук- тивність $Q$ , кг\хв	Тиск $P_n$ , кПа	Продук- тивність $Q$ , кг\хв
25	0,067	1,5	2...4	200	45,0	300	49,6	400	58,6	500	68,0
		3			38,6		44,4		65,8		
		4,5			27,4		29,0		54,0		
	0,055	1,5	2...4	200	40,2	300	48,8	400	57,2	500	54,4
		3			35,2		38,8		44,8		44,0
		4,5			24,0		30,4		37,0		41,8
	0,043	1,5	2...4	200	23,2	300	26,8	400	30,6	500	35,2
		3			21,8		26,4		30,0		29,2
		4,5			18,0		20,8		28,4		28,4
20	0,067	1,5	2...4	200	26,6	300	35,4	400	48,2	500	58,0
		3			21,8		32,4		44,0		52,2
		4,5			15,2		20,0		32,0		36,8
	0,055	1,5	2...4	200	25,2	300	38,6	400	44,0	500	51,4
		3			20,0		30,6		35,4		45,0
		4,5			14,0		21,6		25,6		30,4
	0,043	1,5	2...4	200	23,2	300	26,8	400	30,6	500	35,2
		3			21,8		26,4		30,0		29,2
		4,5			19,4		20,8		28,4		28,4
15	0,067	1,5	2...4	200	18,8	300	18,8	400	22,8	500	24,2
		3			16,8		20,4		20,2		21,0
		4,5			15,4		15,6		16,8		16,4
	0,055	1,5	2...4	200	13,6	300	16,4	400	18,8	500	18,8
		3			12,8		15,2		16,0		17,2
		4,5			7,4		8,0		10,6		12,0
	0,043	1,5	2...4	200	14,0	300	15,4	400	16,0	500	16,8
		3			8,0		8,0		10,0		10,8
		4,5			4,80		6,8		7,2		7,4

## Додаток Г

## чотирифакторний експеримент

Вихідні дані для розрахунк у:

Кількість експериментів:  $n \equiv 27$  Кількість повторностей:  $m \equiv 3$ 

Матриця планування експерименту:

Матриця результатів експерименту:

X :=

	0	1	2	3
0	1	1	0	0
1	-1	1	0	0
2	1	-1	0	0
3	-1	-1	0	0
4	0	0	1	1

Кількість дослідів у центрі плану:

 $n_0 \equiv 3$ 

Y :=

	0	1	2
0	0.73	0.75	0.72
1	0.64	0.64	0.67
2	0.28	0.32	0.28
3	0.25	0.27	0.24
4	0.49	0.48	0.43
5	0.49	0.47	0.47

Табличне значення критерію Стюдента:

 $t \equiv 4.3$ 

Табличне значення критерію Кохрена:

 $G_{таб} \equiv 0.318$ 

Результати розрахунку:

Матриця середніх значень результатів експерименту:

YСЕР<sub>г</sub> =

0.733
0.65
0.293
0.253
0.467
0.477
0.807
0.51
0.507
0.327
0.857
0.68
0.993
0.337

Коефіцієнти регресії:

$$\begin{aligned}
 b_0 & b_0 = 0.45 & b_1 & b_1 = 0.072 & b_2 & b_2 = 0.24 & b_3 & b_3 = 0.12 \\
 b_3 & b_3 = -0.121 & b_{12} & b_{12} = 0.011 & b_{13} & b_{13} = 0.068 & b_{14} & b_{14} = 8.333 \times 10^{-4} \\
 b_{23} & b_{23} = 0.079 & b_{24} & b_{24} = -0.024 & b_{34} & b_{34} = -0.077 \\
 b_{11} & b_{11} = 0.066 & b_{22} & b_{22} = -0.019 & b_{33} & b_{33} = 0.06 & b_{44} & b_{44} = 0.069
 \end{aligned}$$

Критерій Кохрена:

 $G_{роз} = 0.222$   $G_{таб} \equiv 0.318$

**Довірчі інтервали коефіцієнтів регресії:**

$\Delta b_0 = 0.046 \quad \Delta b_j = 0.023 \Delta b_{jr} = 0.04 \quad \Delta b_{jj} = 0.035$

Число ступенів вільності дисперсії неадекватності -  $f_2 = 15$   
 відтворюваності експерименту -  $f_1 = 2$

Дисперсія відтворюваності експерименту:

$S_{y2} = 3.444 \times 10^{-4}$

Дисперсія неадекватності:

$S_{неад2} = 3.85 \times 10^{-4}$

**Критерій Фішера:**

$F_{розр} = 11.178$

**Гіпотезу адекватності рівняння регресії приймаємо коли  $F_{розр} < F_{таб}(0,05, f_2, f_1)$**

Значення функції відгуку отримані за р-ням регресії:

$YR_i =$

0.808
0.665
0.329
0.186
0.502
0.415
0.898
0.504
0.536
0.392
0.778
0.634
0.931
0.293
0.532
0.211

**Остаточні значення коефіцієнтів регресії:**

$b_0 = 0.45$      $b_1 = 0.072$      $b_2 = 0.24$      $b_3, b_2 = 0.12$      $b_4 = -0.121$   
 $b_{12} = 0$      $b_{13} = 0.068$      $b_{14} = 0$      $b_{23} = 0.079$      $b_{24} = 0$   
 $b_{34} = -0.077$      $b_{1j} = 0.066$      $b_{2j} = -0.019$      $b_{3j} = 0.06$      $b_{4j} = 0.069$

## Розрахункові вирази:

Інтервали зміни індексів:

$$d \equiv 0..m-1 \quad i \equiv 0..n-1 \quad j \equiv 0..3 \quad u \equiv n-3..n-1$$

$$q \equiv 0..m-1$$

Середнє значення функції

відгуку:

$$YCER_q := \frac{\left( \sum_q Y_{i,q} \right)}{3}$$

Коефіцієнти регресії:

$$b_0 := \frac{\sum_u YCER_u}{n_0} \quad b_j := \frac{\sum_i X_{i,j} \cdot YCER_q}{12} \quad b_{12} := \frac{\sum_i X_{i,0} \cdot X_{i,1} \cdot YCER_q}{4}$$

$$b_{13} := \frac{\sum_i X_{i,0} \cdot X_{i,2} \cdot YCER_q}{4} \quad b_{14} := \frac{\sum_i X_{i,0} \cdot X_{i,3} \cdot YCER_q}{4} \quad b_{23} := \frac{\sum_i X_{i,1} \cdot X_{i,2} \cdot YCER_q}{4}$$

$$b_{24} := \frac{\sum_i X_{i,1} \cdot X_{i,3} \cdot YCER_q}{4} \quad b_{34} := \frac{\sum_i X_{i,2} \cdot X_{i,3} \cdot YCER_q}{4}$$

$$b_{jj} := \left[ \frac{\sum_i (X_{i,j})^2 \cdot YCER_q}{8} \right] - \left[ \frac{\sum_j \sum_i (X_{i,j})^2 \cdot YCER_q}{48} \right] - \frac{b_0}{2}$$

Дисперсія результатів і-го досліджу:

$$Sy_2^2 := \frac{\sum (Y_{i,d} - YCER_q)^2}{m-1}$$

Критерій Кохрена:

$$G_{\text{роз}} := \frac{\max(Sy_2^2)}{\sum_i Sy_2^2} \quad fl \equiv (n_0 - 1)$$

Дисперсія відтворюваності експерименту:

$$Sy_2^2 := \frac{\sum (YCER_u - b_0)^2}{fl}$$

$$YCER_q := \text{if}(G_{\text{роз}} > G_{\text{таб}}, 0, YCER_q)$$

Дисперсії коефіцієнтів регресії та їх коваріації:

$$S_{b_0}^2 := \frac{Sy_2^2}{3}$$

$$S_{b_j}^2 := \frac{Sy_2^2}{12}$$

$$S_{b_{j_2}}^2 := Sy_2^2 \cdot 0.25$$

$$COV_{b_0 b_j} := -0.16667 Sy_2^2 \quad COV_{b_j b_{j_2}} := 0.0625 Sy_2^2 \quad S_{b_{j_2}} := 0.1875 Sy_2^2$$



### Довірчі інтервали коефіцієнтів регресії:

$$\Delta b_0 := t \cdot \sqrt{S_{b_0^2}} \quad \Delta b_j := t \cdot \sqrt{S_{b_j^2}} \quad \Delta b_{jr} := t \cdot \sqrt{S_{b_{jr}^2}} \quad \Delta b_{jj} := t \cdot \sqrt{S_{b_{jj}^2}}$$

### Число ступенів вільності дисперсії неадекватності:

$$b_j := \text{if}(\Delta b_j > |b_j|, 0, b_j) \quad b_{12} := \text{if}(\Delta b_{jr} > |b_{12}|, 0, b_{12}) \quad b_{13} := \text{if}(\Delta b_{jr} > |b_{13}|, 0, b_{13})$$

$$b_{14} := \text{if}(\Delta b_{jr} > |b_{14}|, 0, b_{14}) \quad b_{23} := \text{if}(\Delta b_{jr} > |b_{23}|, 0, b_{23}) \quad b_{24} := \text{if}(\Delta b_{jr} > |b_{24}|, 0, b_{24})$$

$$b_{34} := \text{if}(\Delta b_{jr} > |b_{34}|, 0, b_{34})$$

$$n_1 := \left( \sum_j \text{if}(b_j \neq 0, 0, 1) \right) \quad n_2 := \text{if}(b_{12} \neq 0, 0, 1) \quad n_3 := \text{if}(b_{13} \neq 0, 0, 1) \quad n_4 := \text{if}(b_{23} \neq 0, 0, 1)$$

$$n_5 := \text{if}(b_{14} \neq 0, 0, 1) \quad n_6 := \text{if}(b_{24} \neq 0, 0, 1) \quad n_7 := \text{if}(b_{34} \neq 0, 0, 1)$$

$$f_2 := 27 - (15 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4 - n_5 - n_6 - n_7)$$

### Рівняння регресії:

$$Y_{R_i} := [b_0 + [b_0 \cdot (X_{i,0})] + [b_1 \cdot (X_{i,1})] + [b_2 \cdot (X_{i,2})] + [b_3 \cdot (X_{i,3})] + [b_{jj} \cdot (X_{i,0})^2] + [b_{jj} \cdot (X_{i,1})^2] + [b_{jj} \cdot (X_{i,1})$$

### Дисперсія неадекватності:

$$S_{неад2} := \frac{\sum_i (Y_{R_i} - Y_{CER})^2}{f_2}$$

### Критерій Фішера:

$$F_{розр} := \frac{S_{неад2}}{S_{y2}}$$

## Додаток Д.

**Інженерна методика розрахунку засобу для добування сапропелю.**

Робочий процес пневматичного засобу для добування сапропелю починається з занурення забірною пристрою, на попередньо встановлену глибину, де починається середній шар сапропелів та надходження стиснутого повітря до змішувача. Внаслідок виходу потоку стиснутого повітря через сопла у середовище сапропелю, що знаходиться всередині змішувача (заповненого при опусканні), утворюється рухоме двофазне середовище, та виконується робота результатом якої є продуктивність пристрою, що обчислюється масою добутої сировини за одиницю часу.

Пошук раціональної форми запропонованого забірною пристрою привів до створення його складових деталей у вигляді тіл обертання (рис. 1). Ефективність такого пристрою залежить від його параметрів, до яких слід віднести об'єм  $V$ , відносне занурення  $\alpha_z$ , коефіцієнт заповнення  $\varepsilon$ . Об'єм залежить від сукупності об'ємів зрізаного конуса (змішувач) та циліндра (піднімального трубопроводу) які визначають розміри самого засобу.

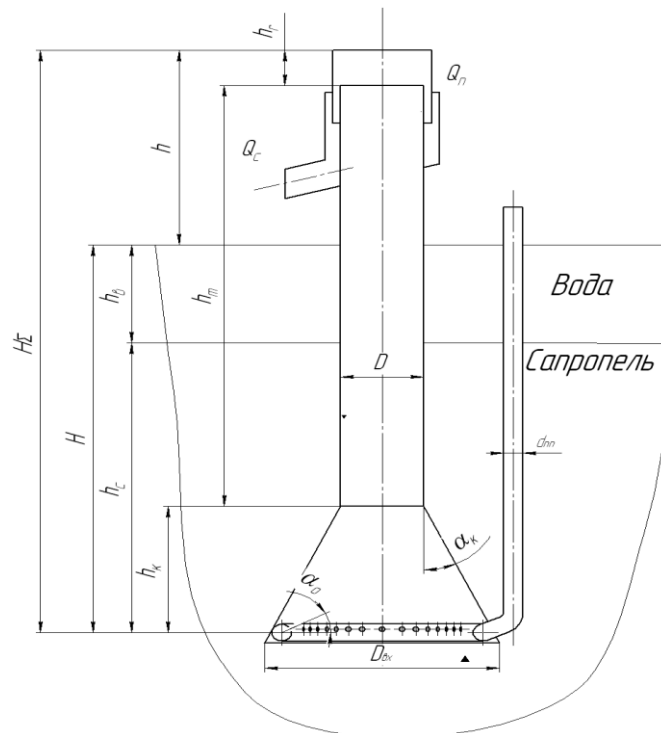


Рис. 1. Розрахункова схема забірною пристрою для добування сапропелю

Повний об'єм  $V$  забірною пристрою для добування сапропелю становить:

$$V = \frac{\pi h_e}{3} (R^2 + r^2 + Rr) + \pi r^2 h_m, \text{ м}^3 \quad (1)$$

де:  $R$  – радіус вхідного отвору змішувача, м;

$r$  – радіус піднімального трубопроводу, він же радіус вихідного отвору змішувача, м;

$h_e$  – геометрична висота конічного змішувача, м;

$h_m$  – геометрична довжина піднімального трубопроводу, м;

$\pi = 3,14$  математична константа.

Відповідно кут нахилу конуса становитиме  $\text{tg} \alpha_k = h_e / R$ .

Залежність, яка пов'язує сумарна геометричну довжину пневматичного добувального засобу із характеристиками родовища сапропелю має вигляд:

$$h + \dot{I} = h_e + h_o + h_r = h + h_a + h_n = H_\Sigma, \quad (2)$$

де  $h$  – геометрична висота розташування пристрою над поверхнею води, м;

$\dot{I}$  – глибина добування сапропелю, м;

$h_k, h_m$  – відповідно висота корпусу та піднімального трубопроводу, м;

$h_a$  – висота води у водоймі, м;

$h_n$  – товщина шару сапропелю з під якого ведеться добування, м;

$h_r$  – висота розташування вивідного розподільчого рукава над піднімальним трубопроводом, м;

$H_\Sigma$  – габаритний розмір пристрою, м.

Залежність якою оцінюється існування снарядної структури руху газорідинної суміші оцінюється відносним зануренням конічного забірною пристрою (змішувача), яке стосовно розглядуваного засобу становить:

$$\alpha_s = \frac{\dot{I}}{\dot{I} + h} = \frac{h_a + h_n}{h_e + h_o + h_r}, \quad (3)$$

Об'ємна продуктивність пневматичного забірною засобу обчислюється з розрахунку об'єму кожної з фаз яка заповнює частину деякого об'єму

середовища  $V$ . Об'ємний коефіцієнт заповнення засобу сапропелем під час роботи з якого визначають К.К.Д становитиме:

$$\varepsilon = V_c / V \quad (4)$$

де  $V_c$  – об'єм сапропелю у суміші об'ємом  $V$ .

Вибір повітродувної машини (компресора) відбувається виходячи з потрібного тиску стисненого повітря та з того щоб втрати напору в ньому не перевищували  $0,1\rho_0gh$ . З урахуванням середньої густини повітря, діаметр підвідного повітропроводу, який переходить у напірний визначають використовуючи рівняння Дарсі-Вейбаха, а сам повітропровід з розрахунків вибирають з каталогу:

$$d_{i.n} = \sqrt[5]{\frac{8\lambda_{\dot{a}} \cdot l_{i.n} \cdot Q_n^2}{\pi^2 \cdot g \cdot (0.01 \cdot \rho \cdot h_{\dot{e}} \cdot \rho_{cp.n} \cdot H_n)}}, \text{ мм} \quad (5)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя;

$l_{n.n}$  – загальна довжина повітропроводу, м;

$H_n$  – довжина вертикальної частини повітропроводу, м;

$\rho$  – середня густина повітря при сталій температурі,  $\text{кг/м}^3$ ;

В такому випадку швидкість виходу повітря з сопла певного діаметру рівна:

$$v_i = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_1}, \text{ м/с}, \quad (6)$$

де  $R$  – газова стала,  $R = 287$  Дж/кгК;

$k$  – показник адіабати для повітря  $k=1,4$ ;

$T$  – температура,  $T=293$  К.

При цьому об'ємна витрата повітря буде рівна:

$$Q_i = n\gamma f \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{\delta^2}{RT_1}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (7)$$

де  $n$  – кількість сопел у напірному повітропроводі;

$\gamma$  – об'ємна вага повітря (при  $+20^\circ\text{C} = 1,185\text{кг/м}^3$ );

$f$  – площа січення сопла, м<sup>2</sup>;

$p$  – тиск повітря на виході з сопла, Па.

Оскільки у змішувач потрапляє повітря у вигляді бульбашок з усіх сопел, де вони об'єднуються і спрямовуються у піднімальний трубопровід займаючи його об'єм у вигляді циліндра, тобто снаряду (штовхача), який підіймає певний об'єм сапропелю, що знаходиться над ним, то вважаємо що площа його вертикальної проекції становить:

$$S_e = \pi \cdot r^2, \text{ м}^2 \quad (8)$$

Кількість сапропелю, що піднімається снарядом у дм<sup>3</sup>/с визначають експериментально або відомою емпіричною залежністю:

$$Q_c = 0,0785 \cdot v \cdot 2 \cdot r^2 / \varepsilon, \quad (9)$$

Тоді швидкість руху снаряду, співпадатиме з швидкістю руху сапропелю, що міститься над ним і становитиме:

$$v = \frac{Q_n \cdot S_e}{\varepsilon} \text{ м/с} \quad (10)$$

Відповідно загальну продуктивність пристрою розраховують:

$$Q = Q_i + 100Q_{\bar{n}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (11)$$

Отже швидкість пневмосуміші у піднімальному трубопроводі становитиме:

$$v_{i-\bar{n}} = Q / (3600\pi D^2 / 4), \text{ м/с} \quad (12)$$

Еквівалентний діаметр піднімального трубопроводу  $D$  залужить від коефіцієнта подачі, що пов'язаний з відносним зануренням засобу і визначається експериментально  $C=f(\alpha)$ , тому при розрахунку діаметра піднімального трубопроводу враховують коефіцієнт запасу і вибирають менший діаметр трубопроводу.

$$D = (Q/C)^{2,5}, \text{ мм} \quad (13)$$

В залежності від кількості стиснутого повітря в снаряді  $V_p = \pi r^2 h_p$  та його тиску  $p_p$  буде визначатись продуктивність пристрою за сапропелем. Об'єм сапропелю що поперемінно транспортується снарядами повітря буде зменшуватись за рахунок налипання сапропелю на стінки трубопроводу та втрат тиску у снаряді з висотою трубопроводу. Це пов'язано із збільшенням глибини добування та довжини  $h_m$ . Отже кількість сапропелю що піднімається снарядом у зоні змішувача буде більша ніж при виході на поверхню. Дане явище характеризується коефіцієнтом  $\beta$  об'ємного розширення, що являє собою відносну зміну об'єму повітря у трубопроводі при зміні тиску з збільшенням його висоти на 1м:

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_\delta} \cdot \frac{1}{\Delta p}, \quad (14)$$

де  $V_p$  – початковий об'єм поршня, м<sup>3</sup>;

$\Delta V$  – зміна об'єму, м<sup>3</sup>;

$\Delta p$  – зміна тиску, Па.

Величина втрат тиску на ділянці  $h_m$  визначається за формулою

$$\Delta p = \rho \cdot \lambda \cdot \frac{h_m}{d} \cdot \frac{v}{2}, \text{ Па} \quad (15)$$

де  $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя по довжині;

$h_m, d$  – довжина і діаметр трубопроводу, м;

Коефіцієнт гідравлічного тертя (коефіцієнт Дарсі) визначаємо, виходячи з режиму руху рідини і відносної шорсткості труби  $\Delta E/d$ , де  $\Delta E$  – еквівалентна шорсткість як правило  $\Delta E = 0,06 \text{ мм}$ .

Режим руху визначають за числом Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{vd}{\mu} \quad (16)$$

де  $\mu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м<sup>2</sup>/с

Для труб промислового виготовлення з природною шорсткістю для будь-якої області опору можна скористатися формулою Альтшуля для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta E}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \quad (17)$$

Для визначення висоти збірного пристрою (змішувача) можна скористатись емпіричною залежністю

$$h_k = 2,5(D_{\hat{a}\hat{o}} - D), \text{ м.} \quad (18)$$

Даний розрахунок доцільно застосовувати при проектуванні збірної пристрою для добування сапропелю, для забезпечення якості виконання роботи, та отримання сапропелевої сировини потрібного гатунку.

## Додаток Е

**ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ УКРАЇНИ ПО ВОДНОМУ ГОСПОДАРСТВУ**  
**Волинське обласне виробниче управління водних ресурсів і водного господарства**

43005, Волинська область  
м. Луцьк, вул.8 Березня, 1  
код 03322, тел/факс 3-44-13,  
e-mail: vod@gosp.lutsk.ua

13345605, рах. 35215016000005  
ГУДК у Волинській області  
м. Луцьк МФО 803014

*11.08.09* № *962/12/06-09*  
На № 1136-15-25 від 11.08.09

**Проректору з наукової  
роботи Луцького національного  
технічного університету  
Шваб'юку В.І.**

Волинський облводгосп погоджує проведення аспірантом університету Хомичем С.М. науково-практичних досліджень на озері Зяцьке Старовижівського району з метою перевірки роботоздатності пневматичного збірного пристрою для добування сапропелю.

Заступник начальника  
управління

**Т. Корнійчук**





Міністерство охорони навколишнього природного середовища України  
**Державне управління охорони навколишнього природного  
 середовища у Волинській області**

43025, м. Луцьк, вул. С. Бандери, 20, код 05523926, тел. 28-17-40, р-р 35211001000144 в ГУДКУ м. Луцьк

*12.08.09* № *2027/04*  
 На № 1137-15-25 від 12.08.09

Проректору з наукової роботи  
 Луцького національного технічного  
 університету  
 Шваб'юку В.І.  
 43018, м.Луцьк, вул.Львівська,75

Про проведення досліджень  
 на оз.Зяцьке

Розглянувши Ваше звернення щодо надання Держуправлінням дозволу на проведення науково-практичних досліджень на озері Зяцьке Старовижівського району, враховуючи наявність позитивного висновку Волинського облводгоспу від 11.08.09 №962/12/06-09 щодо вищезазначеної діяльності, Держуправління не заперечує щодо проведення цих робіт аспірантом Хомичем С.М. на вказаному озері з метою перевірки роботоздатності пневматичного забірної пристрою для добування сапронело за умови дотримання вимог природоохоронного законодавства при проведенні робіт та проведення рекультивційно-ліквідаційних робіт після завершення науково-практичних досліджень.

Роботи проводити з відому органів місцевого самоврядування.

Перший заступник  
 начальника Держуправління

О.В.Романюк

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Директор ТОВ «Зендер-Україна»  
 «Зендер»  
 Ідентифікаційний код 36579730  
 Середюк І. О.  
 « 29 » квітня 2011 р.

### Акт проведення лабораторно-виробничих випробовувань пневматичного засобу для добування сапропелів

Акт склала комісія в складі: голова – директор ТОВ «Зендер-Україна» Середюк І. О.; члени комісії – заступник головного інженера ТОВ «Зендер-Україна» Новосад Д. В; к.т.н., доцент завідувач кафедри інженерного та комп'ютерного забезпечення агропромислового комплексу Луцького НТУ Цизь І. Є.; д.г.н., професор кафедри екології Фесюк В. О; асистент кафедри інженерного та комп'ютерного забезпечення агропромислового комплексу Луцького НТУ Хомич С. М.

Лабораторно-виробничі випробування пневматичного засобу для добування сапропелів проводили на озері Зяцьке Старовижівського району Волинської області при його роботі із сапропелями органічного типу.

При проведенні випробувань засіб комплектувався складовими частинами, які дозволяли змінювати наступні конструктивні та технологічні параметрами: кут нахилу твірної корпусу  $\alpha=15^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$ ; довжина піднімального трубопроводу  $l=1,5\text{м}$ ,  $3\text{м}$ ,  $4,5\text{м}$ ; діаметр піднімального трубопроводу  $d=0,043\text{м}$ ,  $0,055\text{м}$ ,  $0,067\text{м}$ ; тиск нагнітання повітря  $P=300\text{кПа}$ ,  $400\text{кПа}$ ,  $500\text{кПа}$ . Глибина добування змінювалась в межах  $2\dots 4\text{м}$  у зв'язку з зануренням пристрою, висота води в озері становила  $0,7\text{м}$ .

В результаті випробовувань встановлено, що у процесі роботи пристрою за вищенаведених конструктивних та технологічних параметрів відбувається добування середнього шару сапропелю природної вологості, при цьому екологічні порушення системи акваторії озера не відбуваються. Продуктивність пристрою за відповідним його компонуванням наведена в табл. 1.

Дана конструкція пневматичного засобу для добування сапропелів є роботоздатна. Комісія рекомендує впровадити розроблений пневматичний засіб для добування сапропелів у комплекс обладнань по добуванню органічного сапропелю з метою забезпечення сільського господарства органічними добривами, або сировиною для приготування органічно-мінеральних добрив.

Таблиця 1. Значення продуктивності пневматичного засобу для добування сапропелів.

Кут нахилу твірної корпусу $\alpha$ , град	Діаметр трубопроводу $d$ , м	Довжина трубопроводу $l$ , м	Глибина Добування $h$ , м	Тиск $P$ , кПа	Продуктивність $Q$ , кг/хв	Тиск $P$ , кПа	Продуктивність $Q$ , кг/хв	Тиск $P$ , кПа	Продуктивність $Q$ , кг/хв
25	0,067	1,5	2...4	300	49,6	400	58,6	500	68,0
		3			44,4		59,6		65,8
		4,5			29,0		46,6		54,0
	0,055	1,5	2...4	300	48,8	400	57,2	500	54,4
		3			38,8		44,8		44,0
		4,5			30,4		37,0		41,8
	0,043	1,5	2...4	300	26,8	400	30,6	500	35,2
		3			26,4		30,0		29,2
		4,5			20,8		28,4		28,4
20	0,067	1,5	2...4	300	35,4	400	48,2	500	58,0
		3			32,4		44,0		52,2
		4,5			20,0		32,0		36,8
	0,055	1,5	2...4	300	38,6	400	44,0	500	51,4
		3			30,6		35,4		45,0
		4,5			21,6		25,6		30,4
	0,043	1,5	2...4	300	26,8	400	30,6	500	35,2
		3			26,4		30,0		29,2
		4,5			20,8		28,4		28,4
15	0,067	1,5	2...4	300	18,8	400	22,8	500	24,2
		3			20,4		20,2		21,0
		4,5			15,6		16,8		16,4
	0,055	1,5	2...4	300	16,4	400	18,8	500	18,8
		3			15,2		16,0		17,2
		4,5			8,0		10,6		12,0
	0,043	1,5	2...4	300	15,4	400	16,0	500	16,8
		3			8,0		10,0		10,8
		4,5			6,8		7,2		7,4

Голова комісії:

І. О. Середюк

Члени комісії:

Д. В. Новосад

І. Є. Цизь

В.О. Фесюк

С. М. Хомич



ПОГОДЖЕНО  
Директор ГОВ «Зендер-Україна»  
"Зендер"  
Середук І. О.  
2011р.



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Декан машинобудівного факультету  
Львівського НТУ  
д.т.н. проф. Пустольга С.І.  
12 травня 2011р.

### ПРОТОКОЛ

#### виробничих випробувань пневматичного засобу для добування сапропелю

Виробничі випробування пневматичного засобу для добування сапропелів проводили на озері Зяцьке Старовижівського району Волинської області при його роботі із сапропелями органічного типу природної вологості. Максимальна висотою водного дзеркала становила 0,5м.

До початку випробувань було підготовлено плавзасіб – човен Салют-4Є; бензиновий генератор Firman FPG7800E2, однофазний максимальною потужністю 2,5кВт, напругою 220В та частотою 50Гц компресор EURO 210/24 потужністю 1,5кВт продуктивністю 206л/хв., та максимальним робочим тиском 800кПа і пневматичний забірний засіб який комплектувався корпусом (змішувачем) з кутом нахилу твірної 30°, піднімальним трубопроводом довжиною 4,5м і діаметром 0,1м.

Реалізація випробувань полягала у наступному. Засіб для добування сапропелю занурювався безпосередньо в поклади сапропелю на глибину 3м. Після чого запускали бензиновий генератор, який застосовувався як джерело електричної енергії для компресора. Вмикали компресор, ресивер якого наповнювали атмосферним повітрям до тиску 800кПа. Потім відкривали золотник компресора, через який надходило стиснуте повітря до робочого органу через пневмопровід у кількості 500кПа, при цьому підтримувалась постійна робота компресора. В процесі виходу повітря з робочого органу та взаємодії з сапропелем відбувалося його розрихлення, забір та піднімання до надводної поверхні. Після запуску засобу та набуття ним усталеного режиму роботи фіксувалась хвилинна продуктивність. Оскільки процес добування був неперервним, то пристрій при роботі поступово занурювався через збільшення матеріалу, тому глибина добування змінювалась від початку випробувань до завершення в межах 0,5м.

В результаті випробувань встановлено, що у процесі роботи пристрою відбувається добування середнього шару сапропелю природної вологості приблизно 93...80% з-під поверхневого – пелогену при цьому порушення системи акваторії озера не відбувається. Продуктивність пристрою становить приблизно 105кг/хв..

Дана конструкція пневматичного засобу для добування сапропелів є роботоздатна та рекомендується до впровадження у лінії виробництва по добуванню органічного сапропелю з метою забезпечення сільського господарства добривами, або сировиною для їх приготування.

Укладач

Хомич С.М.



**ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО  
«КОВЕЛЬСІЛЬМАШ»**

45007, Україна, Волинська обл.,  
м. Ковель, вул. Паршавська, 1;  
телефакс (03352) 6-10-82, 6-10-70  
тел. для довілок: 6-10-03, 6-10-02  
юридичний відділ: 6-10-24

Р/р 2600502007059  
Відділення №7  
ЦФ ПАТ «КРЕДОБАНК»,  
МФО 325365  
Код ЗКПО 00238138

e-mail: post@kovelselmash.com

Від 19.05.2011 № 50/01-1732

**ДОВІДКА**

Видана кафедрі сільськогосподарського машинобудування Луцького національного технічного університету про те, що передані матеріали теоретичних та експериментальних досліджень інженера Хомича Сергія Миколайовича, щодо обґрунтування параметрів пневматичного забірної пристрою для добування сапропелю отримані ПАТ «Ковельсільмаш», при вивченні схвалені і можуть бути використанні для проектування засобів для добування сапропелю.

Голова правління



*[Signature]*  
М.М. Заїкін





УКРАЇНЬСЬКА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК  
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР  
"ІНСТИТУТ МЕХАНІЗАЦІЇ ТА ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА"  
ННЦ "ІМЕСГ"



08631, Україна, Київська обл.,  
Васильківський р-н, смт. Глеваха-1,  
вул. Вокзальна, 11

Тел. (04471)-31-100, 32-102, 32-104  
Факс. (04471)-32-988

UKRAINE ACADEMY OF AGRARIAN SCIENCES  
NATIONAL SCIENTIFIC CENTRE  
"INSTITUTE FOR AGRICULTURAL ENGINEERING AND  
ELECTRIFICATION"  
NSC "IAEE"



11, Vokzalna Str., Glevakha-1,  
Vasykiv district, Kiev region,  
08631 UKRAINE

Tel: +038-(04471)-31-100, 32-102, 32-104  
Fax: +038-(04471)-32-988

big 30.09.09 № 688

### ДОВІДКА

Колесне Сергій Миколайович.

приймав участь у XVII Міжнародній науково-технічній конференції  
ННЦ «ІМЕСГ» 30 вересня – 1 жовтня 2009 року «Технічний прогрес у  
сільськогосподарському виробництві». Секція схвалила доповідь на

тему: Обрундування карбових риб  
зад'рягою чресерою у м'ягочубих

селекційно

Заступники директора:

Вчений секретар

Голова секції



О.В.Сидорчук

М.В.Молодик

В.П.Островський

Міністерство аграрної політики та продовольства України

Вінницький національний аграрний університет

XIII міжнародна наукова конференція

«Сучасні проблеми землеробської механіки» присвячена 112-ій річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка

17-18 жовтня 2012 року

### ДОВІДКА

Видана Хомишу Сергію Михайловичу  
про те, що він (вона) брав (ла) участь у роботі XIII міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвяченій 112-ій річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка та виступив (ла) з доповіддю на тему: Обґрунтування теоретичної продуктивності плевчатих (серійного) пристрою для добування сапропель

Декан факультету механізації та електрифікації сільського господарства



І.П.Паламарчук



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
 КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
 25006, Кіровоград, проспект Університетський, 8, тел.: 55-92-34,  
 факс 55-92-53, E-mail: kntu@infocom.kr.ua

29.10.09 № \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_

## Довідка

Видана Каленюк С.М.

в тому, що він (вона) прийняв(ла) участь у VII Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки” 28-30 жовтня 2009 року. Секція схвалила доповідь на тему:

*Результати експериментального дослідження продуктивності пшениці твердого здрірного призначення для добування борошна*

Проректор з наукової та методичної роботи КНТУ  
 к.т.н., професор

В.М. Кропівний

Голова секції  
 к.т.н., професор

П.В. Сисолін

Секретар секції  
 к.т.н., професор

С.І. Шмат





## Довідка

Видана Коміссу Сергію Миколайовичу

в тому, що він (вона) прийняв(ла) участь у III міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в агропромисловому і лісовому комплексах та переробній галузі» 2-3 червня 2011 року. Секція схвалила доповідь на тему:

Фізичне моделювання механічного кришення  
(сиринга) для добування сапороно

Заступник голови  
організатору д.т.н., проф.



Дідух В.Ф.

## ДОВІДКА

Видана Коміссу Сергію Миколайовичу

про те, що він (вона) брав (ла) участь у IV Міжнародній науково-практичній конференції „ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В АПК” 5-6 червня 2013 р. у Луцькому національному технічному університеті.

Секція схвалила доповідь на тему: Дослідження коефіцієнта  
динамічної в'язкості органічного сапороно

Голова Організатору  
конференції, ректор ЛНТУ,  
д.т.н., проф.



В.В. Божидарнік



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
 КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
 25006, Кіровоград, проспект Університетський, 8, тел.: 55-92-34,  
 факс 55-92-53, E-mail: rektor@kntu.kr.ua

№ \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_

## Довідка

Видана Гришу Серію Михайловичу

в тому, що він (вона) прийняв (ла) участь у ІХ Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки” 7-8 листопада 2013 року. Секція схвалила доповідь на тему:

Дорівнювання електричних мікроелементів  
пристроїв для дорівнювання струму  
сигналів



Перший проректор КНТУ

д.т.н., професор

Заст. голови оргкомітету

д.т.н., професор

Секретар оргкомітету

д.т.н., доцент

М.М. Петренко

М.О. Свірень

Д.І. Петренко