

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Луцький національний технічний університет

С.М. Хомич, І.Є. Цизь

# ДОСЛДЖЕННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАСОБУ ДЛЯ ПНЕВМАТИЧНОГО ДОБУВАННЯ САПРОПЕЛЮ

МОНОГРАФІЯ

$$V = -g + \frac{2}{\mu \cdot (2 \cdot P_{\text{атм}} + 2 \cdot \rho)} \cdot \lambda \cdot \theta \cdot \tau \cdot \frac{R \cdot T}{\mu} \cdot Q \cdot \lambda$$

ЛУЦЬК РВВ ЛНТУ- 2016

УДК 631.3:621:695:553:973(043.3)

ББК: 41.47

3 12

**Хомич С.М.**

Дослідження та обґрунтування параметрів засобу для пневматичного добування сапропелю: Монографія / С.М. Хомич, І.Є. Цизь. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2016. – 132 с.

**Рецензенти:**

**Гевко Б.М.**, доктор технічних наук, професор, кафедри «Автомобілів» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя;

**Дідух В.Ф.**, доктор технічних наук, професор, кафедри «Інженерного та комп’ютерного проектування АПК» Луцького національного технічного університету;

**Фесюк В.О.**, доктор географічних наук, професор, завідувач кафедри «Фізичної географії» Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки.

Монографія присвячена розробці засобів екологічно чистого добування сапропелів з мінімальними енергетичними витратами, для отримання органічних добрив, а також збереженню і відновленні замулених озер.

В монографії представлені відомості про окремі фізичні та механічні властивості озерного сапропелю, як об’єкта органічних добрив, що використовуються в сільському господарстві. Проаналізовано технології та засоби для добування сапропелів, які знаходяться під шаром води. Представлено теоретичне узагальнення і нове технічне вирішення науково-прикладної задачі, яка полягає у добуванні сапропелю з підводних родовищ природної вологості шляхом формування повітряно-сапропелевої суміші. Запропоновано нові конструкції засобів для очищення озер від сапропелів.

Рекомендується науковцям, аспірантам, студентам та технічним працівникам, які займаються питаннями добування озерних сапропелів.

*Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради  
Луцького національного технічного університету  
(протокол №13 від 29 червня 2016 року)*

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА .....</b>	5
<b>РОЗДІЛ 1. Сучасний стан питання та задачі дослідження .....</b>	6
1.1. Механізм впливу сапропелю на родючість ґрунтів та особливості його використання.....	6
1.2. Загальна характеристика та огляд досліджень властивостей сапропелю.....	15
1.3. Аналіз конструкцій засобів та пристрій для добування сапропелю.....	21
1.4. Аналіз теоретичних досліджень забірних пристрій.....	32
1.5. Висновки і задачі дослідження.....	37
<b>РОЗДІЛ 2. Теоретичні передумови обґрунтування параметрів забірного пристрою засобу для добування сапропелю .....</b>	38
2.1. Загальна методика дослідження.....	38
2.2. Обґрунтування конструктивної схеми забірного пристрою та засобу для добування сапропелю.....	40
2.3. Дослідження робочого процесу забірного пристрою.....	43
2.4. Моделювання процесу руху повітряного потоку в середовищі сапропелю.....	47
2.5. Обґрунтування теоретичної об'ємної продуктивності забірного пристрою засобу для добування сапропелю .....	60
2.6. Дослідження закономірності зміни об'ємного газовмісту за висотою змішувача забірного пристрою .....	74
2.7. Конструктивні розробки пневматичних механізмів для добування сапропелю.....	63
2.8. Висновки до розділу 2.....	67
<b>РОЗДІЛ 3. Програма і методика проведення експериментальних досліджень .....</b>	68
3.1. Програма експериментальних досліджень.....	68
3.2. Прилади, обладнання та апаратура для проведення досліджень.....	69
3.3. Методики проведення лабораторних експериментальних досліджень та виробничих випробувань.....	74
3.3.1. Методика відбору зразків сапропелю.....	74
Методика визначення природної вологості сапропелю.....	74
3.3.2. Методика визначення зольності покладів.....	75
3.3.3. Методика визначення об'ємної маси сапропелю.....	76
3.3.4. Методика визначення в'язкості сапропелю.....	76
3.3.5. Методика дослідження траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості.....	79
3.3.6. Методика дослідження продуктивності забірного пристрою для добування сапропелю і структури потоку двохкомпонентного середовища у висхідній течії корпусу та підймального трубопроводу.....	79
3.3.7. Методика виробничих випробувань засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм.....	81
3.3.8. Методика виробничих випробувань засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм.....	85

3.3.9. Інженерна методика розрахунку пневматичного забірного пристрою засобу для добування сапропелю.....	90
3.4. Висновки до розділу 3 .....	94
<b>РОЗДІЛ 4. Результати експериментальних досліджень.....</b>	<b>95</b>
4.1. Результати визначення природної вологості органічного сапропелю.....	95
4.2. Результати визначення зольності органічного сапропелю.....	97
4.3. Результати визначення об'ємної маси органічного сапропелю.....	99
4.4. Результати дослідження в'язкості органічного сапропелю.....	101
4.5. Результати дослідження траєкторії руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості.....	106
4.6. Результати дослідження продуктивності забірного пристрою для добування сапропелю і структури потоку двохкомпонентного середовища у висхідній течії корпусу та підйомального трубопроводу.....	111
4.7. Результати виробничих випробувань засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм.....	113
4.8. Розрахунок економічної ефективності.....	117
4.9. Висновки до розділу 4.....	120
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>122</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>124</b>

## ПЕРЕДМОВА

Відклади прісноводних водойм, що є цінним природним ресурсом органічної речовини яка складається із залишків водних організмів і продуктів їх розкладу називають сапропелі, вони мають унікальні властивості та використовуються в багатьох галузях промисловості і сільському господарстві.

Різноманітні умови формування даних підводних відкладів в значній мірі визначають їх якісний склад. У залежності від зольності і хімічного складу мінеральної частини виділяють органічний, кремнеземистий, карбонатний і змішаний типи сапропелів.

Оскільки на території України розташована значна кількість озер, котловини яких заповнені сапропелями, переважно органічного типу, а дослідниками доведено, що саме органічні сапропелі можна використовувати у сільському господарстві, як добрива, оскільки вони чинять комплексну дію на підвищення родючості ґрунтів (насамперед збільшення гумусу), підвищують врожайність сільськогосподарських культур та покращують якість продукції, то необхідно поєднати процеси добування та використання органічних сапропелевих відкладів з метою вирішення обох системних питань.

На території Західного Полісся України є більше 80 водойм де з кожним роком процеси накопичення органічних сапропелів помітно прогресують та з року в рік їх кількість зростає, це пов'язано з відсутністю альтернативних технологій добування та переробки сапропелів. Прогресуючі процеси евтрофії в водоймах вимагають вживання невідкладних заходів із протидії даному явищу.

Першочерговим завданням для використання сапропелів являється їх добування, яке залежить від умов залягання сапропелю: в діючих озерах – під шаром води та мертвих (зниклих) – під шаром торфу. Останні утворюються десятиліттями за рахунок накопичення відкладів та перетворення озер на болота.

Добування сапропелів, з під шару торфу є простим але надто енерговитратним тому в більшості відбувається за допомогою землерийних машин, оскільки сапропелі менш вологі та придатні до екскавації. В свою чергу для цього потрібні дуже затратні підготовчі роботи.

Умови добування сапропелів з під шару води досить різноманітні та, специфічні, адже глибина їх залягання може бути різна. Вони потребують індивідуальних підходів у залежності від типу сапропелю а також цільового призначення покладів. До органічного сапропелю який добувають з підводних родовищ для виробництва добрив ставлять особливі вимоги в першу чергу це природна вологість та непорушність структури, оскільки за таких умов процес зневоднення покладів та подальшої переробки є оптимальний.

Зважаючи на вищезазначені вимоги та проблеми актуальним є питання обґрунтування параметрів нової конструкції засобу, яка забезпечила б ефективний процес добування сапропелю для сільського господарства з мінімальними енергетичними втратами та без проблемних еконаслідків.

Метою дослідження, результати якого представлені в монографії є вибір раціональних режимів роботи, та обґрунтування параметрів засобу для пневматичного добування сапропелю з під шару води.

## РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 МЕХАНІЗМ ВПЛИВУ САПРОЕЛЮ НА РОДЮЧОСТЬ ГРУНТІВ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

Серед відомих факторів, що сприяють формуванню високого врожаю сільськогосподарських культур з належними якісними показниками, головна роль належить родючості ґрунтів, що є основою сільськогосподарського виробництва. Постійне її підвищення забезпечується як правильним обробітком та науково обґрунтованими сівозмінами, так і значною мірою системою удобрення. Головне завдання землеробства передбачає максимальне і раціональне використання ґрунтів та забезпечення росту і врожайності сільськогосподарських культур [2, 4, 5]. Великим резервом для підвищення родючості ґрунтів є використання органічних добрив, у тому числі сапропелів.

Сапропель – (в перекладі з старогрецької, „мул що гніє“) це геологічні, органічні, природні відклади у прісноводних водоймах (зокрема в озерах) вихідним матеріалом яких являються відмерлі залишки водних організмів і продуктів їх розкладу: водоростей, риб, тварин, комах а також інших решток і решток які потрапляють до води з суші. Сапропелеві відклади формуються при недостатній кількості кисню, або повністю його відсутності [12, 13, 14, 15, 25]. У натуральному вигляді сапропель желеподібна або зерниста маса від рожевого до коричнево-оливкового і майже чорного кольору при взаємодії з повітрям змінює колір у сторону потемніння (рис. 1.1). При висиханні до вологості  $W=14\dots20\%$  піддається затвердінню, адже володіє цементуючими властивостями і майже не піддається розмочуванню.



Рис. 1.1. Фото свіжо добутого органічного сапропелю з різних озер:  
а) – оз. Зяцьке; б) – оз. Сомине; в) – оз. Синове

Негативне явище зниження родючості ґрунтів відбувається під впливом наступних процесів: виснаження ґрунту (зменшення запасів гумусу та поживних речовин внаслідок неправильного обробітку та внесення добрив, вторинне засолення, вторинне заболочення тощо); втома ґрунту (накопичення в ньому різних токсичних елементів, викликаних неправильними 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 700кг поживних речовин [2, 4].

В результаті цих процесів значно зменшується вміст гумусу. За результатами різних джерел в період 1881-2011 в Україні він знизився майже на третину (з 4,2 до 3,2%), і втрати зростають [2, 4, 5, 25]. Через зниження родючості ґрунту, також змінюється гранулометричний та хімічний склад, структура, знижується його продуктивність. Тому невідкладним завданням сучасної науки є вивчення змін властивостей ґрунтів під впливом як природних так і агротехнічних та антропогенних чинників, а також забезпечити збільшення гумусу в ґрунті.

Проте, родючість ґрунту має здатність відтворюватись, поліпшуючи сукупності властивостей, самостійно або з допомогою певного втручання. Заходи щодо підвищення продуктивності земель та їхньої охорони дуже різноманітні й повинні здійснюватися комплексно, це являється основою утворення гумусово-акумулятивного процесу, як єдиної системи, що взаємно доповнюють одна одну і посилюють дію всіх інших.

Установлено, що швидкість і спрямованість самостійної гуміфікації в ґрунті залежать від багатьох факторів. Основними серед них є кількість і хімічний склад рослинних решток, водний і повітряний режими, склад ґрунтових мікроорганізмів, реакція ґрутового розчину, гранулометричний склад ґрунту тощо. Певне співвідношення даних факторів і їх взаємодія зумовлюють певний тип гуміфікації органічних решток. Зазвичай комплексне поєднання таких процесів в ґрунті є одиничним та досить довгостроковим і не до кінця доведеним, оскільки кожна з реакцій проходить з неоднаковою тривалістю, у різні пори року, певній температурі і т. п. В переважній більшості стадії процесу гуміфікації не співпадають комплексно, а тому проходять протягом декількох років. Також нестабільність кліматичних умов може спричинити порушення та перешкоджання самостійної гуміфікації ґрунту.

Отже поліпшувати якісний склад ґрунту потрібно з допомогою певного втручання. Одним із основних таких заходів є науково обґрунтована система удобрення.

На Поліссі України, а саме у Волинській області, переважно дерново-підзолисті ґрунти, які характеризуються низькою природною родючістю, тому внесення добрив, особливо органічних, є визначальним фактором в отриманні високих врожаїв. 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. Багаточисленні дослідження, проведені в різних природно-кліматичних зонах близького і далекого зарубіжжя свідчать про те, що саме озерні відклади, як правило, вдосконалюють елементи родючості ґрунтів, та володіють ними [2, 25].

До факторів, що впливають на родючість ґрунту відносять наступні елементи, які О. М. Грінченко зобразив у вигляді шестигранника, всі вони

зв'язані між собою і утворюють єдине ціле. Тільки врахування всієї сукупності факторів дає можливість підвищувати врожай.

На основі відомих досліджень виконаємо аналіз механізму впливу сапропелів на родючість ґрунту за наведеною схемою (рис. 1.2).

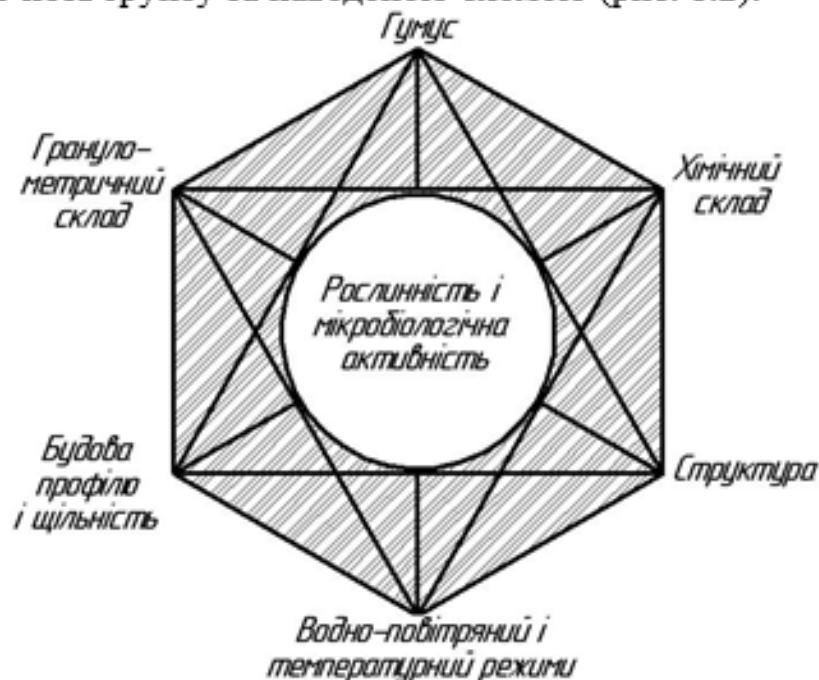


Рис. 1.2. Природні фактори родючості ґрунту (за О. М. Грінченко)

З метою підвищення ефективної і природної родючості ґрунту необхідно одночасно вплинути на всі фактори життя і росту рослин та проваджувати нові науково обґрунтовані системи удобрення та землеробства а також використовувати різного виду добрива які б в подальшому негативно не впливали на ґрунт в цілому [4, 5].

Компоненти, які одночасно впливають на всі фактори життя, розвитку і росту рослин задовольняють їх всіма необхідними умовами, дефіцитними поживними речовинами, а також водою, біотичним та фізико-хімічним середовищем, формують мікробіологічну активність та розширене відтворення родючості ґрунту, містяться і у сапропелі.

Різноманітність складових частин ґрунту дуже велика і містить низку позитивних та негативних компонентів, які взаємодіють між собою, головна роль у сукупності цих елементів належить гумусу, як основному чиннику родючості (рис. 1.3).

У гумусі проходить низка гетерогенних, динамічних, полідисперсних процесів які взаємодіють з високомолекулярними азотистими ароматичними сполуками кислотної природи.

Властивості та рівень родючості ґрунту залежить не лише від кількості гумусу, а й від його якості. 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 завляки вітровій та водній ерозії. Тому при внесенні в ґрунт, як у натуральному

вигляді так і у складі компостів, сапропель являється цінним матеріалом, що доповнює, вдосконалює та відтворює складову органічної частини якісних гумусових речовин, та забезпечує швидку активізацію процесу гумусу утворення в ґрунті. Внаслідок чого гумус разом із сапропелем формують єдиний компонент для родючості в орному шарі.

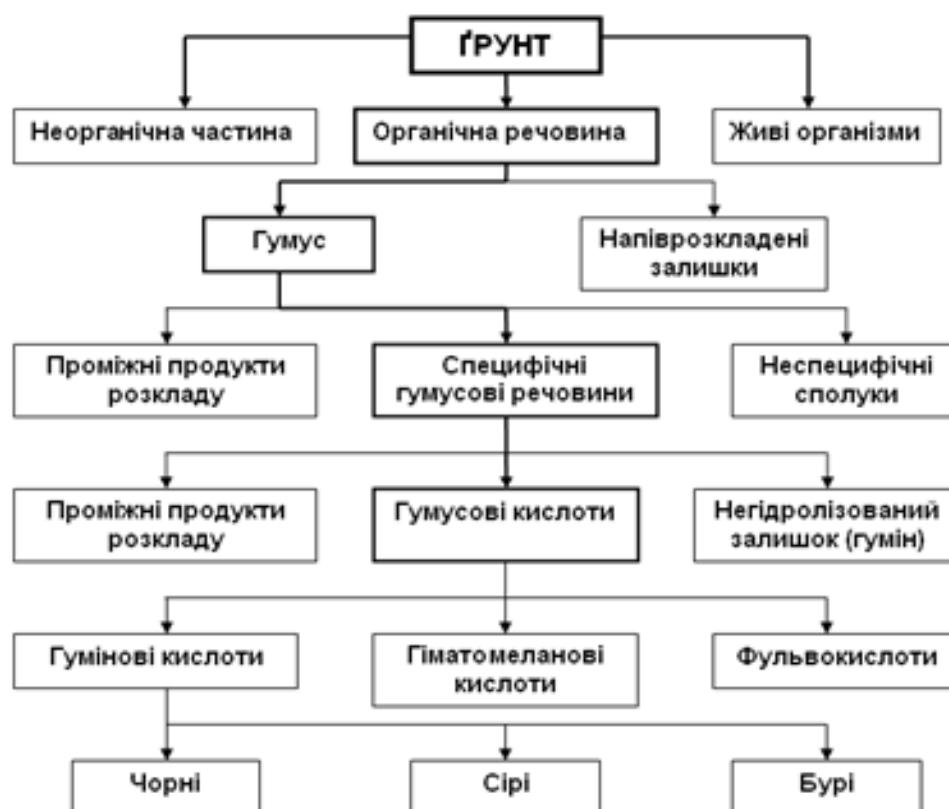


Рис. 1.3. Система органічних речовин гумусу (за Д.С. Орловим).

Вміст органічної речовини в залежності від типу сапропелів становить 15 – 94,3% на суху речовину [19] де одночасно протікають біо-фізико-хімічні процеси перетворення органічних залишків, в специфічні різновиди органо-мінеральні сполуками, які перебуваючи у капілярно-колоїдно згустому стані, встановлюють агрономічну цінність гумусу, а через їх сукупність з ґрунтом – його родючість [4].

До складу сапропелю входять практично всі елементи живлення рослин, а також ферменти, антибіотики, вітаміни, завдяки чому утворюється певний резерв поживних і фізіологічно активних речовин. Крім того сапропель забезпечує структуроутворення ґрунту та формування гранулометричного складу, що відіграє певну роль у формуванні рослинної, мікроорганічної активності родючості ґрунту та сприяє розвитку мікроорганізмів [3].

Для різних генетичних горизонтів ґрунтів характерні певні форми структури. Але особливо важлива є грудкувато-зерниста структура. Змішування сапропелів з ґрунтом формує сприятливу структуру тобто окремості (агрегати, грудки) різної величини, форми, якісного складу. Кожний агрегат являється комплексом механічних елементів, які закріплені в макро- (діаметр більше

0,25мм) та мікро агрегати (менше 0,25мм) органо-мінеральними колоїдами, детритами і іншими зв'язками [2].

Для різних генетичних горизонтів ґрунтів характерні певні форми структури. Зустрічаються грудкувато-зерниста, горіхувата, пластинчato-лускувата, брилиста та інші форми вираження структури, але особливо важлива є грудкувато-зерниста структура [2].

Сапропелі складається з окремих розмірних груп, частинок (фракцій). У фракціях в діапазоні розмірів 0,01 – 0,001мм знаходиться найцінніша частина добрив – окиси заліза, алюмінію, марганцю, каолін, фосфати і інші, які володіють пластичністю, липкістю, цементуючими властивостями, здатністю набухати. Такі властивості сапропелю у поєданні з ґрунтом, особливо пісчаного походження, утворюють саме грудкувато-зернисту структуру і сприятливий гранулометричний склад, який є найкращою і найефективнішою складовою для проростання, росту і життя рослин та сільськогосподарських культур. Чим менші за діаметром елементи у фракціях, тим, в десятки разів покращується структура ґрунту удосконалюється гранулометричний склад та збільшується вміст гумусу, а також відбувається краще засвоєння поживних речовин рослинами [2, 25].

М.З. Лопотко вважає, що сапропель та добрива на його основі у відповідності до гранулометричного складу повинні бути диференційовані по місцю їх внесення: на важких ґрунтах, у розмірі, щоб формувалися фракції більші 7мм, на піщаних – менше 3мм. Це пояснюється тим, що тверда фаза ґрунту складається з різного ступеня дисперсності (подрібнення), а мулисті фракції, особливо колоїдні частинки, які мають різний хімічний склад, в поєданні з ґрунтом по різному взаємодіють і в переважній більшості утворюють грудково-зернисту структуру [3].

Згідно вимог, що ставляться до сапропелевих добрив, вологість готової продукції при внесенні в ґрунт повинна становити близько 60%, а норми внесення змінюються залежно від типу ґрунту, природно кліматичних умов, культури, тощо в межах від 40 до 80 т/га. [2, 12, 13, 15, 18, 21, 23, 24, 25].

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.

Таким чином сапропель забезпечує сприятливе структуроутворення ґрунту та формування гранулометричного складу, що відіграє значну роль у формуванні рослинної і мікроорганічної активності родючості ґрунту та сприяє розвитку мікроорганізмів.

Отже структура ґрунту тісно взаємопов'язана з гранулометричним складом, разом вони формують будову профілю.

Також для сапропелю характерна коагуляційна здатність (згортання, з'єднання, склепування, зв'язування), тобто при взаємодії двох колоїдних

частинок, які мають протилежні заряди відбувається взаємна коагуляція – з'єднання (колоїдів гумусу та колоїдів сапропелю (гідроксиду алюмінію, заліза, марганцю і ін.)), у пористі зерна, а вони в свою чергу у суцільну пастоподібну речовину, що дуже важливо для оцінки структуроутворюючої ролі вказаних фракцій. Чим більше у ґрунті сапропелю з гуміновими і фульвокислотами при наявності кальцію, тим зернини пористіші і вологостійкіші. Вони не розчиняються у воді і мало розпушуються при оранці.

З вище перерахованого випливає, що гранулометричний склад ґрунту формує структуру та залежить від поєднання його з іншими частинками, які представлені органічними та мінеральними зернами найбільша кількість яких знаходиться саме у сапропелях. Мулисті фракції містять значну кількість гумусу та елементів живлення для рослин, покращують структуру та збільшують якісний гранулометричний склад [2, 25].

Важливим параметром ґрунту є будова його профілю, а отже і щільність та пористість. J. Schuurman, (1965), K. Mesweeney, I. Jansen (1984), В.В. Медведев (1991р) та ін. зазначають, що в результаті високої щільності 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 поровий простір гармонійно розподілений за достатньою кількістю вологи та повітря. Саме із збільшенням в ґрунті органічних добрив формується достатня кількість структурних крупних і дрібних пор, яких удостається розпушувальної дії ґрунту [4, 5].

Як орний так і підорний горизонти характеризуються високою щільністю, яка співставляється з високими значеннями щільності твердої фази, а також з незадовільною пористістю і, особливо, низьким вмістом пор, заповнених продуктивною вологою. Верхні горизонти ґрунту мають меншу щільність – 0,8-1,2г/см<sup>3</sup>, ніж нижні – 1,3-1,6г/см<sup>3</sup>, ця величина залежить від мінералогічного та гранулометричного складу ґрунту, його структурного стану, вмісту органічної речовини, обробітку тощо. Для підзолистих ґрунтів щільність твердої фази складає 2,40-2,65г/см<sup>3</sup>, а для торф'яних 1,4-1,8г/см<sup>3</sup>.

А.С. Меєровський, Г.В. Виновець досліджували тенденції зміни щільності складу ґрунту у верхньому шарі під впливом усіх органічних добрив. Дослідження які були проведені на дерново-підзолистих ґрунтах, на глиинах 20, 25, 30 см. Встановлено, що внесення сапропелю та сапропеле-гнойових компостів у співвідношенні (1:1) у середніх та максимальних дозах помітно знижує щільність ґрунту на всіх трьох досліджуваних глиинах. Пояснюється таке зниження механічною розпушувальною дією добрив, зумовленою більш низькою щільністю їх твердої фази та більш низькою об'ємною масою. У зв'язку із зниженням щільності складу відносно збільшується пористість ґрунту, що чіткіше проявляється у варіанті з компостами. Л.В. Круглов, Н.Г. Душин та ін. (1992) дослідили, що при систематичному внесенні органічних добрив щільність ґрунту знизилась не менше ніж на 0,2г/см<sup>3</sup>, а загальна шпаруватість збільшилась на 6-7%.

Наступним критерієм родючості ґрунту є водно-повітряний і температурний режим, вплив сапропелю та сапропелевих добрив на ці критерії полягає в наступному. При внесенні сапропелю в ґрунт спостерігається сприятлива його дія на водно-фізичні властивості, зокрема збільшення повної та капілярної вологоємкості, вологоутримуючої властивості вологозапасів та вологості верхнього горизонту. Діапазон зміни водно-фізичних властивостей ґрунту залежить від кількості внесеного сапропелю та його хіміко-механічного складу [12, 25]. Також Є.І. Томіна, А.І. Фоміна стверджували про позитивну дію сапропелевих добрив на водний режим ґрунту [25].

У ґрунту вода виконує шість основних функцій:

- вода є одним із факторів ґрунтоутворення й процесів вивітрювання мінералів;

- без втручання води не відбувається гумусоутворення;
- хімічні реакції відбуваються тільки у водному середовищі;
- під впливом води проходить формування ґрунтового профілю;
- регулювання температури ґрунту відбувається за допомогою води;
- вода є головною у підтримці життя рослин і організмів.

Повітревміст ґрунтів залежить від їх гранулометричного складу та ступеня структурованості. М.З. Лопотко, Г.А. Євдокімова встановили, що внесення сапропелевих добрив в дозах 50-60т/га сприяє зростанню шпаруватості та нормальної аерації ґрунту, тобто некапілярної повітроємкості, повітроємкості міжагрегатних пор або пористості аерації, збільшує продуктивну вологість в горизонті на 0,2-0,4г/см<sup>3</sup> [2].

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

Хімічний склад ґрунту являється функцією гранулометричного складу. Сапропелі містять широку гаму хімічних мікроелементів та органічних сполук. Тому при внесенні в ґрунт миттєво підвищується їх вміст. Особливу роль у формуванні гранулометричного складу та родючості ґрунту, а також розвитку рослин відіграють наступні 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, ферментами і ін.) [14]. Разом вони утворюють розчинні і нерозчинні комплексні з'єднання які являються активними та дефіцитними у фізіологічних процесах.

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 5тис. до 11млн. на 1г. сухої речовини сапропелю, а це в свою чергу значно підвищує

водоповітряну проникність, пористість, покращує структуру та обмін мікроелементів [5,14, 18].

В цілому дослідження, які проводились в різних природних зонах як за кордоном так і в Україні показали високу ефективність сапропелевих добрив на родючість сільськогосподарських культур.

Сапропелі доцільно вносити на піщаних і супісчаних ґрунтах, так як їх ефективність там значно вища ніж на ґрунтах важкого механічного складу. Дія сапропелю і добрив на його основі не закінчується одним роком, вони надають позитивний вплив у багаторічній післядії елементів органо-мінерального складу на урожай інших культур при застосуванні правильних науково обґрунтованих сівозмін [12, 15, 19, 25].

Середня прибавка урожаю культур при дослідженнях коливалася від 60 до 120%.

Деякі значення позитивного впливу сапропелів на урожайність сільськогосподарських культур наведені дещо нижче.

Так наприклад найвищу енергетичну ефективність в ланці сівозміни (картопля, озиме жито, однорічні трави) на дерново-підзолистих ґрунтах забезпечують компости за участю сапропелю та курячого посліду у співвідношенні 1:1 їх коефіцієнт енергетичної ефективності становить 1,92.

На дерново-підзолистому пісчаному ґрунті при внесенні мінеральних добрив N<sub>70</sub>P<sub>60</sub>K<sub>120</sub>, приблизно, зібрано 139 ц/га бульб картоплі; гною 40 т/га – 177 ц/га; торфу 40 т/га – 128 ц/га, а при внесенні сапропелю 40 т/га – 138 ц/га, 60 т/га – 148 ц/га, 80 т/га – 174 ц/га; без добрив 101 ц/га. Збільшенняожної тони сапропелю на 1га давало надбавку від 23 до 91 кг бульб. Післядія досліджувалась впродовж наступних двох років. На ріллі з внесеним 40 т/га органічним сапропелем урожай зерна ячменю склав 32,0 т/га, 60 т/га – 36,2 ц/га, 80 т/га – 38,5 ц/га, без добрив – 21,0 ц/га. Урожайність третього року для овесу відповідно становила 26,5 ц/га, 28,1 ц/га, 29,5 ц/га, без добрив – 20,2 ц/га.

Застосування кремнеземного сапропелю на дерново-підзолистому супісчаному ґрунті в нормі 60 т/га дозволило зібрати урожай цибулі-ріпки 228 т/га, 120 т/га – 261 ц/га, без добрив – 195 т/га. В цих же дослідженнях урожай цикорію без добрив складав – 266 ц/га. Внесення 40 т/га сапропелю забезпечив урожай цикорію 296 ц/га, 80 т/га – 316 ц/га, 120 т/га – 356 ц/га. Урожай озимої пшениці без добрив зібраний 19,3 ц/га, а при застосуванні сапропелю 40 т/га – 22,2 ц/га, 80 т/га – 25,1 ц/га, 120 т/га – 27,5 ц/га і 160 т/га – 32,8 ц/га.

Позитивні результати дії сапропелю виявилися і при вирощуванні цукрового буряка та соняшників на силос. Так при безпосередньому внесенні під буряк 60 т/га сапропелю урожай коренеплодів склав 309 ц/га, 120 т/га – 326 ц/га, 180 т/га – 348 ц/га. При внесенні 60 т/га гною підстилкового урожай отриманий 318 ц/га, без добрив 252 ц/га. В перший рік післядії 60 т/га сапропелю збір зеленої маси соняшників становив 380 ц/га, 120 т/га – 395 ц/га, 180 т/га – 415 ц/га, 60 т/га гною – 422 ц/га, без добрив – 372 ц/га.

Збільшення норми внесення сапропелю в ґрунт до 300 т/га, що в декілька раз вище оптимальної не підвищувало врожайність культур. Багаторазове перевищення норм внесення може бути причиною нітратного забруднення та

порушення солового режиму ґрунту, що призводить до забруднення навколошнього середовища.

Аналіз отриманих даних показує, що 80т сапропелю 60% вологості на суху речовину, по своїй дії і післядії еквівалентний 60т гною підстилкового. Застосування сапропелів як основу складових для компосту з гноєм підстилковим, пташиним послідом, вапном, аміачною водою тощо, а також у складі гранульованих органо-мінеральних добрив помітно збільшує урожайність та зменшує норми внесення [12, 15, 18, 19, 20, 21].

Значення сапропелю, компостів і добрив на його основі, для підвищення врожайності досліджувались і для інших усіх сільськогосподарських культур в результаті отримані позитивні показники, що дозволяють говорити про сапропель як важливий компонент для ґрунту.

Сапропелі вносять, як добрива для культур, у нормах, які визначаються для кожного поля окремо, виходячи із конкретних місцевих умов, виду культури і агрохімічної характеристики раніше застосованих добрив. Під час вирощування сільськогосподарських культур варто визначати норми сапропелю по еквіваленту основних елементів живлення рослин які знаходяться в ньому, а також за вмістом азоту.

Термін внесення і способи заробки сапропелевих добрив під всі культури не відрізняються від традиційних, особливо сприятливим являється локальний. Сапропелі на відміну від інших органічних добрив не потребують обов'язкової заробки в ґрунт зразу ж після розповсюдження їх по полю і можуть зароблятися через 3 – 7 днів.

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

Сапропель доцільно вносити на піщаних і супісчаних ґрунтах, так як його потенціал там значно вищий і має великий ряд різноманітних компонентів які впливають на підвищення врожайності протягом трьохрічної дії, а також найвищу енергетичну ефективність в ланці правильних сівозмін.

Тому існує потреба в подальшому глибокому вивчені властивостей озерного сапропелю як об'єкта органічних добрив, а також у створені і вдосконалені нових технологій та методів добування покладів з підводних родовищ які б максимально відповідали вимогам для формування добрив, знижували енергетичність переробних процесів а також не порушували екосистем водойми та не несли за собою екологічних наслідків.

## 1.2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ОКРЕМИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ САПРОПЕЛЮ

Згідно інженерно-геологічної класифікації гірничих порід (В.Л. Саваренського із змінами та доповненнями В.Д. Ломтадзе), сапропелі можна віднести до п'ятої групи осадкових порід особливого складу, властивостей і стану. Породи цієї групи характеризуються специфічними властивостями, потребують спеціальних методів дослідження та індивідуальної оцінки [13].

Із літературних джерел відомі лише окремі роботи, які стосуються вивченням властивостей сапропелів. Дослідженням властивостей сапропелю приділяли значну увагу Лиштван И.И., Рубинштейн А.Я., Лопотко М.З., Євдокимова Г.А., Бракш Н.И., Вимба Б., Косаревич И.В., Вирясов Г.П., Мартинсон А.Г. та інші. [6, 7, 11, 12, 33, 34, 42, 72, 104, 108, 127, 128, 130, 106].

Основна частина цих досліджень присвячена визначенню властивостей сапропелів у природному стані. Ці характеристики використовувались для проектування меліоративних систем, споруд, робочих органів механізмів для їх добування, рушій транспортних засобів.

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

Також сапропелі представляють собою складну багатокомпонентну полідисперсну систему і поділяються на наступні стадії в залежності від глибини залягання [33, 34]:

- стадія суспензій (пелоген);
- стадія текучого стану;
- стадія пластичного стану;
- напівтверда стадія.

У вигляді текучого та пластичного стану сапропелі займають найбільшу частку відкладів озера, вони формують середній шар родовища та являються найбільш небезпечними для завмиралля озера. Саме сапропелі середнього шару необхідно добувати з метою відновлення озера. В свою чергу дані сапропелі володіють природною вологістю приблизно 83...93% (на практиці ці параметри визначаються висушуванням зразка у сушильній шафі до постійної маси при температурі, що становить 105-110°C згідно ГОСТ 11305-65.), та являються найбільш придатними, для підвищення родючості ґрунті.

Специфічною особливістю сапропелю являється високе вологонасичення, тобто кількість води, яка знаходиться в його порах у природному стані. Вміст води у сапропелях оцінюється двома показниками: відносною  $w$  (кількість води в сапропелі виражена у відсотках до загальної його маси) і абсолютною  $W$  (кількість води 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 вологоємкість. 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 різнятися. Для органічних сапропелів (зольністю до 30%) щільність знаходитьться 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 1400-2700 кг/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 свіжодобутих сапропелів збільшується під час висихання матеріалу (рис. 1.4.), причому для мінералізованих сапропелів ці зміни помітніші ніж для малозольних [21, 43].

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.

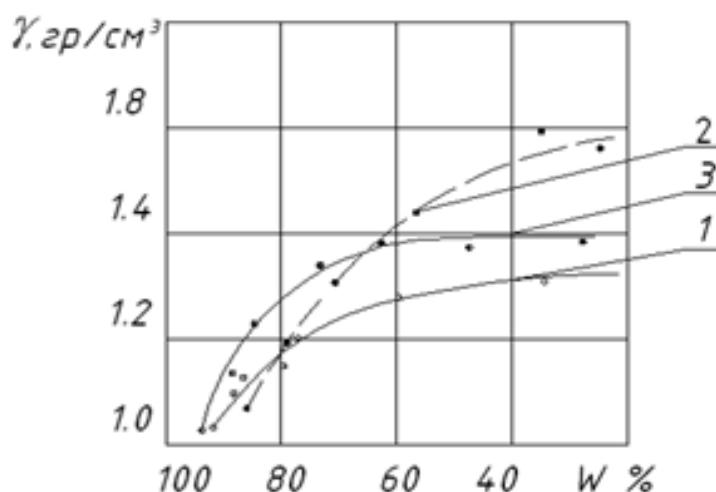


Рис. 1.4. Зміна об'ємної маси від вологості сапропелю за видами:  
1 – органічний; 2 – кремнеземний; 3 – карбонатний

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, фракції 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 поглинutoї 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 висушенні 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].

Границі 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  $\operatorname{tg}\varphi_0$  ( $\varphi_0$  – кут внутрішнього тертя) та зчеплення сапропелю. Дослідження проведено Лопотко М.З. за даною методикою на приладі П10-С дозволили отримати дані наведені у табл. 1.2 [43].

Таблиця 1.2

Середнє значення характеристик напруженів зсуву

Сапропель	Відносна вологість, %	Зчеплення, кг/см <sup>2</sup>	$\operatorname{tg}\varphi_0$
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 пенетрації за допомогою конічного пластоміра конструкції

М.П. Воларовича та С.Н. Макарова із кутом твірних конуса  $45^\circ$  [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 суттевого впливу зміни нормального навантаження не спостерігається, оскільки значення напруження зсуву знаходиться у межах 448...458 Па, що відповідає межам 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 непорушені структури мають більш високі граничні напруження зсуву ніж сапропелі порушені 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  $+15^\circ\text{C}$  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  $+12^\circ\text{C}$  до  $+20^\circ\text{C}$  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]:

$$V_W = V_{\text{ніж}}(1 + \beta_V W), \quad (1.3)$$

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

$V_{\text{зд}}$  – 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].

Сапропелі різних родовищ значно відрізняються по кількісному вмісту і складу зооутворюючих компонентів. Верхня межа величини зольного залишку (85%) прийнята умовно, нижня – складає 4-7%.

При оцінці сапропелів з позиції їх практичного використання, переробки, виділення або концентрації окремих компонентів важливо визначення форм зв'язку зольних елементів з органічною речовиною.

Залежно від форм зв'язку неорганічних елементів з органічною речовиною їх можна розділити на три групи:

- неорганічні компоненти, відокремлювані фізичним методом;
- неорганічні компоненти що переходят в розчин при кислотній або лужній обробці;
- міцно зв'язані неорганічні компоненти.

Вміст зольних елементів першої групи в сапропелях по відношенню до загальної зольності в кремнеземних сапропелях досягає 45%, в карбонатних – 14%, в органічних – 10%.

При використанні сапропелів в сільськогосподарській практиці і в деяких інших областях представляє інтерес вивчення їх радіоактивності.

Найбільшою радіоактивністю володіють кремнеземні сапропелі. Це пояснюється, мабуть, наявністю в зольній частині великою кількістю калію. До того ж в зольній частині кремнеземних сапропелів ймовірніша присутність і інших важких радіоактивних елементів.

Радіоактивність сапропелів змінюється залежно від глибини залягання. Шар покладу на глибині 3-4 володіє підвищеною активністю, а у залягаючих нижче шарів активність близька до нуля.

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 та подальше їх застосування. 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 забірного 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 землевисмоктувальні 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, які при цьому використовуються (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Класифікація технологій добування сапропелів

У відомих технологіях добування озерних покладів найбільш широко використовується механічна енергія, енергія гідрравлічного 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 пристрій 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 pontonі, 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 пристрію [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. 1.6) для добування сапропелю, із малих за площею водойм, дозволяє позбутись недоліків описаних вище пристрій [7]. Проте застосування такої установки на середніх та великих озерах є економічно недоцільним. Процес добування надто повільний та енергозатратний, відбувається збовтування води, що несе за собою негативні екологічні наслідки.

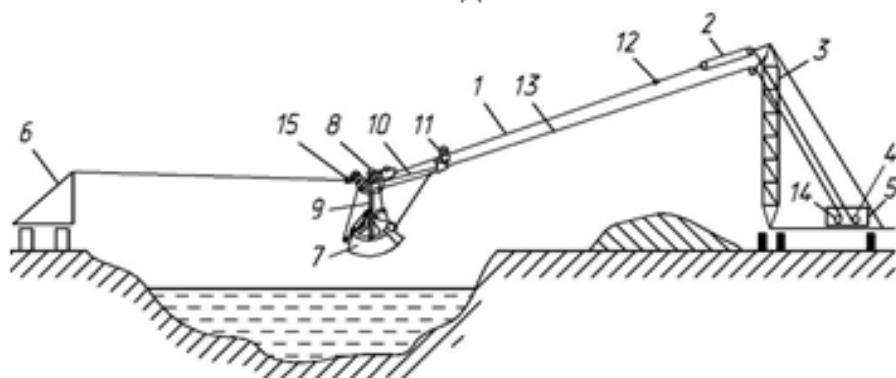


Рис. 1.6. Канатно-скреперна установка для добування сапропелю: 1 – несучий канат; 2 – блоки; 3 – велика башта; 4 – барабан; 5 – лебідки; 6 – мала башта; 7 – ківш; 8 – каретки; 9 – важелі; 10 – канат; 11 – ролик; 12, 15 – упор; 13 – тяговий канат; 14 – тяговий барабан

Використання шнекових забірних пристрій [6, 53, 130, 131] за механічного способу добування дозволяє забезпечити неперервність процесу. Існують конструктивні рішення, шнекових забірних пристрій, які можуть

зведнювати сапропель у процесі його добування (рис. 1.7) [53, 131]. Широке впровадження таких пристрій обмежується значною їх металомісткістю, особливо для значних глибин добування та складністю механізму приводу робочого органу. Також за рахунок збільшення глибини добування відбувається порушення процесу піднімання покладів, оскільки сапропель налипає на витки шнеку та не переміщується вгору, обертання шнеку продовжується без подальшого піднімання сапропелю.

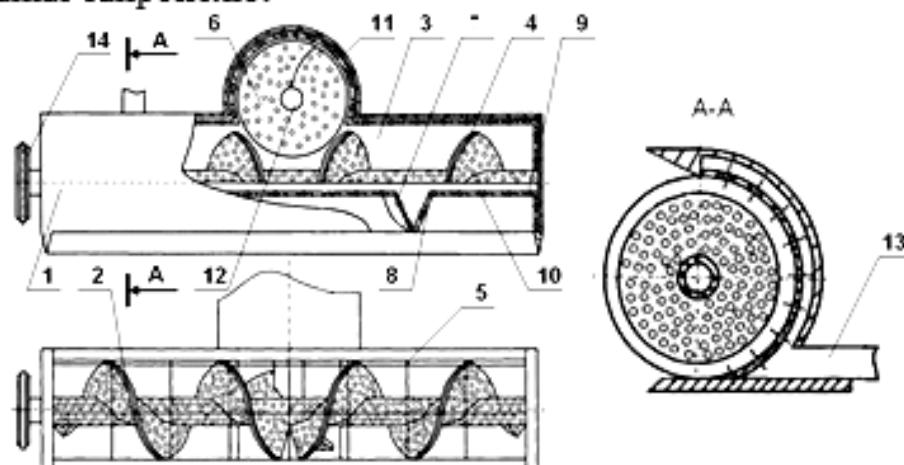


Рис. 1.7. Пристрій для добування сапропелю із шнековим робочим органом: 1 – корпус; 2, 4 – перфоровані шнеки; 3 – всмоктуюча насадка; 5 – вікно; 6 – піднімальний шнек; 7 – протиріжучі пластини; 8 – ножі; 9, 10, 11, 12 – порожнини; 13 – відсмоктуючий патрубок; 14 – привод

Для добування сапропелю разом із поверхневим його шаром (пелогеном), який може містити значну кількість рослинності, розроблений горизонтально-фрезерний забірний пристрій (рис. 1.8) [64]. Подавання сапропелю від забірного пристрою до баржі здійснює гвинтовий конвеєр. Недоліками такого добувного засобу являються: значна металомісткість, складний механізм приводу, низька екологічність, потрапляння води у зону забору.

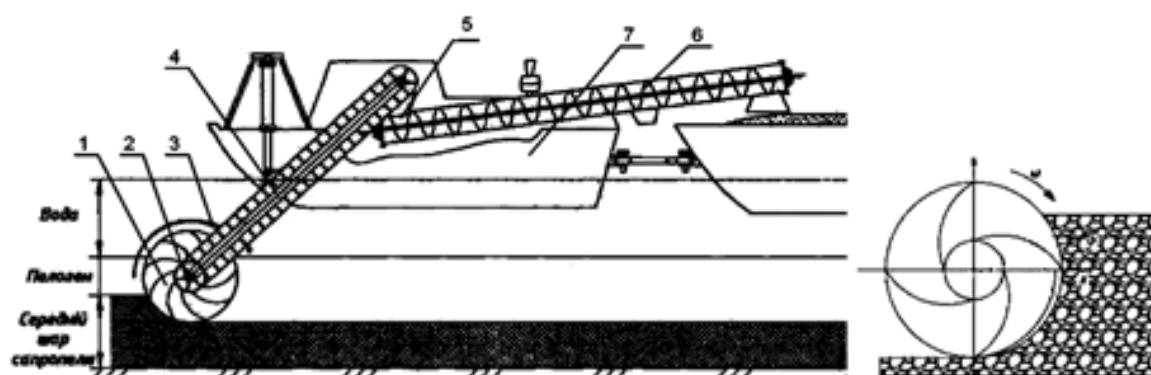


Рис. 1.8. Схема засобу для добування сапропелю із горизонтально-фрезерним забірним пристроям: 1 – забірна фреза; 2 – шнек; 3 – корпус; 4 – скребковий транспортер; 5 – бункер; 6 – шнековий прес; 7 – плавзасіб

Отже зазначені засоби для добування сапропелю із механічними забірними пристроями лише частково забезпечують виконання необхідних вимог, вони є металомісткі та енергозатратні в більшості сконструйовані без врахування екологічних передумов.

Засоби, які застосовуються для добування сапропелю із використанням гідралічної енергії можна поділити на дві підгрупи за типом забірного пристрою: із вільним всмоктуванням та із гідралічним розрихлювачем.

Щодо першої підгрупи, суміш сапропелю із водою (сапропелева пульпа) вільно всмоктується через насадки різноманітної конструкції ґрутовим насосом з поверхневого шару покладів.

Для унеможливлення забивання забірної насадки рослинністю запропоновано ряд захисних пристрой. Найпростіші з них передбачають використання рухомих чи нерухомих решіток або ножів з торця насадки. Такий ґрунтозабірний пристрій (рис. 1.9) містить всмоктуючу насадку 1 та шарнірно закріплена на ній рухому решітку 3 [43]. Привод решітки здійснюється реверсивною лебідкою 2. Момент включення лебідки визначається граничним значенням розрідження у всмоктуючому трубопроводі (контролюється вакуометром).

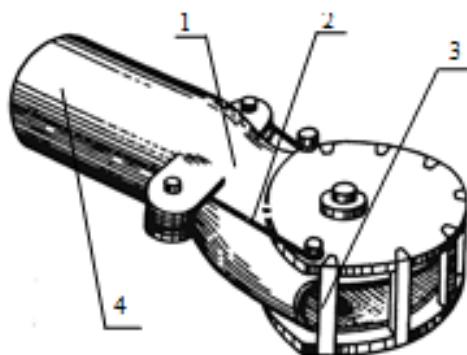


Рис. 1.9. Забірний пристрій з рухомою решіткою: 1 – всмоктуюча насадка; 2 – привід решітки; 3 – рухома решітка; 4 – піднімальний трубопровід

Такий пристрій забезпечує задовільні результати під час добування мало в'язких сапропелевих покладів підвищеної вологості за траншейного способу розробки родовища. Але у випадку папільонажного способу розробки (робочий орган поперемінно переміщується 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 інший забірний пристрій фрезерного типу (рис. 1.10) [43].

Особливістю цього пристроя є робоча фреза, яка забезпечує розрихлення злежаних покладів сапропелю, а також перерізвння рослинного покриву який присутній в акваторії озера. Пристрій забезпечує роботу при папільонажному способі розробки тобто почерговій зміні напрямку руху вправо та вліво. Застосування такої конструкції забірного пристроя для верхнього

рівномірність розробки поверхні покладів. Застосування даного пристрою для добуванні середніх і нижніх шарів покладів потребує потужних насосних установок та значних енерговитрат.

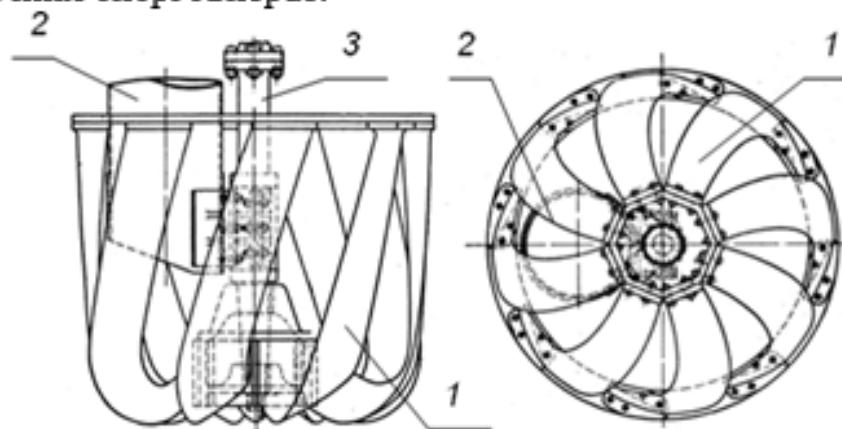


Рис. 1.10. Забірний пристрій: 1 – фреза; 2 – всмоктувальний трубопровід; 3 – привід фрези

Розробка конструкцій забірних пристрій, які належать до другої підгрупи, спричинена необхідністю розпушенння покладів енергією гідралічного потоку при розробці нижніх, більш ущільнених, шарів сапропелю [43, 58, 67, 70]. На рисунку 1.11 представлена конструктивна схема такого забірного пристрою [43].

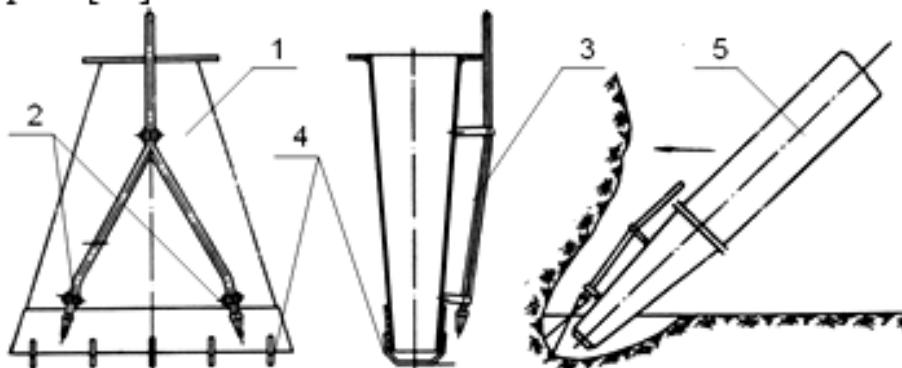


Рис. 1.11. Забірний пристрій з гідралічним розрихлювачем: 1 – корпус; 2 – форсунки; 3 – магістраль подачі води; 4 – захисна решітка; 5 – підйомна труба

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

Також існує ряд конструктивних схем забірних пристрій з гідралічним розрихлювачем для добування корисних копалин із підводних родовищ. Дані пристрої запропоновані для спеціальних типів покладів де дозволяють покращити якість роботи (рис. 1.12) [67, 70, 89].

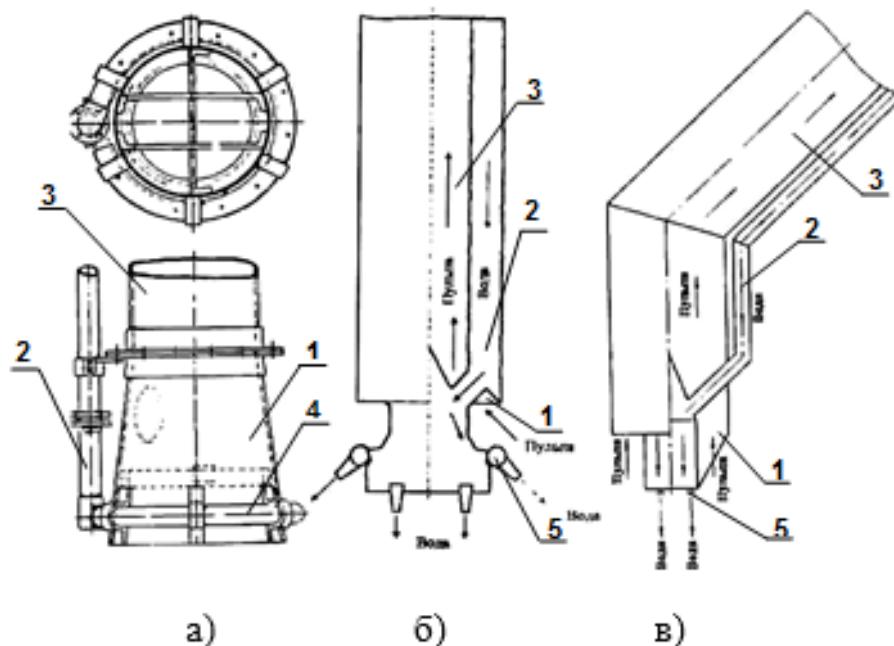


Рис. 1.12. Модифікації забірних пристрій із гідравлічним розрихлювачем: а) – з кільцево-форсунковим напірним апаратом; б, в) – з форсунковим напірним апаратом; 1 – корпус; 2 – магістраль подачі води; 3 – піднімальний трубопровід; 4 – кільцевий напірний повітропровід з форсунками; 5 – головка напірної порожнини з форсунками

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 розпушенння середніх та нижніх шарів сапропелю призводить до значного зниження концентрації сухої речовини у добутій пульпі, тобто до значного зростання вологості добутого продукту.

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 пристрій, які працюють за наведеним принципом можна поділити на роторні, шнекові та фрезерні.

В якості типового роторного забірного пристрою можна розглянути конструкцію розроблену Е.Р. Волковим, Н.В. Дубровським, М.З. Лопотком [43]. Особливість запропонованої конструкції (рис. 1.13) 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.

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 розпушенння та добування сапропелевої пульпи консистенцією 40 – 60 г/л.

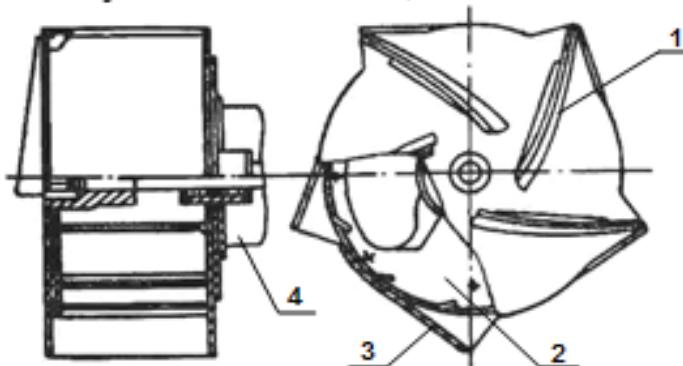


Рис. 1.13. Роторно-ковшовий ґрунтозабірний пристрій: 1 – передня лопатя, 2 – ротор з ковшами, 3 – захисна решітка, 4 – всмоктуюча труба

Для розробки сапропелевих покладів з великою кількістю рослинності пропонується використовувати шнеково-скреперуючі забірні пристрої з подрібнюючим апаратом і рухомим екраном (рис. 1.14). Пристрій оснащений ріжучим елементом у вигляді шнеку, що забезпечує подрібнення рослинних решток, які потрапляють у забірну частину [43, 44, 58].

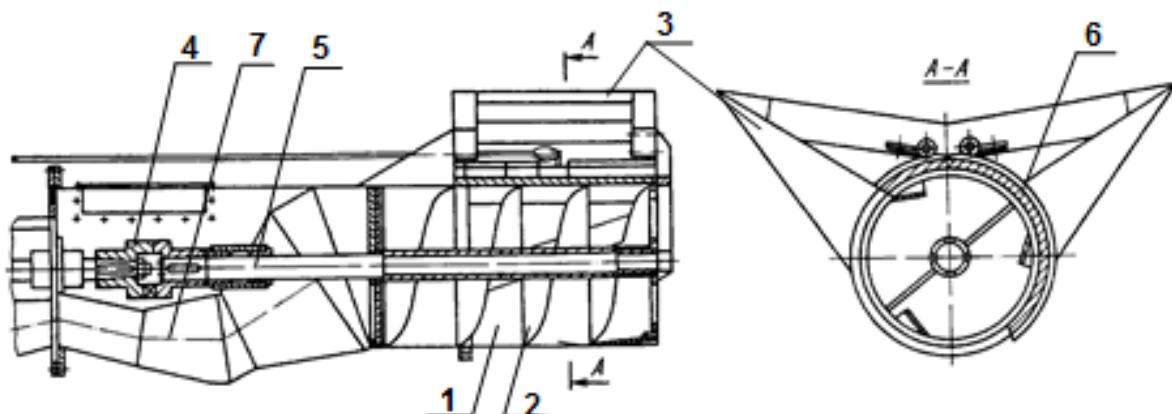


Рис. 1.14. Шнеково-скреперний забірний пристрій: 1 – корпус; 2 – шнек; 3 – рухомий екран (скрепер); 4 – муфта; 5 – вал; 6 – поворотний кожух; 7 – піднімальний трубопровід

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. 1.15). 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  $110 \text{ м}^3/\text{год}$ .

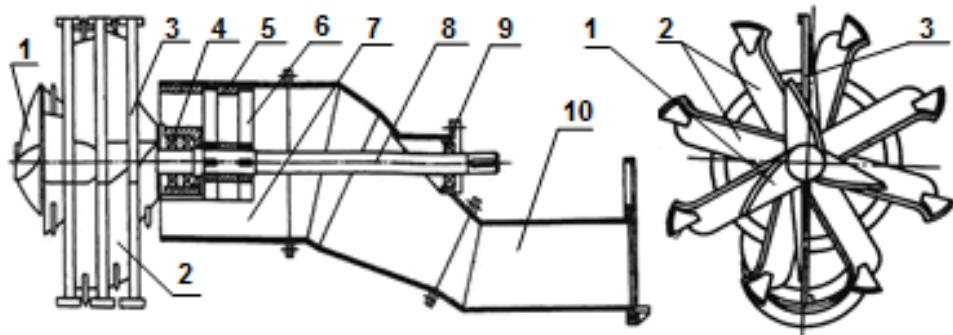


Рис. 1.15. Забірний пристрій для розробки зарослих донних покладів: 1 – торцева фреза; 2 – ріжучий ніж; 3 – протиріжучий ніж; 4, 9 – опора; 5, 6 – ніж статор та ніж ротор подрібнювач; 7 – всмоктувальний патрубок; 8 – вал; 10 – підйомний трубопровід

З уdosконаленням конструкцій всмоктувальних пристріїв запропоновано використовувати гідравлічно вібраційні розрихлювачі (рис. 1.16) для глибоко розміщених злежаних сапропелів, які зосереджені на глибині понад 15...20м від поверхні водного дзеркала.

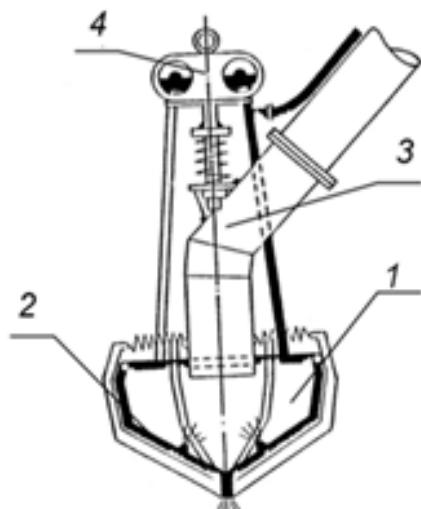


Рис. 1.16. Вібраційний забірний пристрій: 1 – вібраційна чаша; 2 – водяний трубопровід; 3 – всмоктувальний трубопровід; 4 – механізм підйому (корпус)

Враховуючи складність фрезерних механічних забірних пристріїв, вібраційні гідравлічні зарекомендували себе дещо позитивніше, адже завдяки в'язкості і текучості сапропелів та з допомогою вібрації відбувається порушення структури покладів. Це дає змогу кращому переміщенню покладів від периферії до центру за воронкового способу добування, та забезпечує краще переміщення покладів по піднімальному трубопроводі під час всмоктування. В свою чергу пристрій має недоліки і унеможливлює добування сапропелів природної вологості, а лише у суміші їх з водою оскільки оснащений трубопроводом по якому вода подається в зону вібрації також пристрій не забезпечує задовільну роботу з зарослими підводними покладами.

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 пристрій та впровадження їх під час добування сапропелю невиправдано приділялось мало уваги. Адже за гідралічних та гідромеханічних технологій добування спостерігається протиріччя, яке полягає у наступному. Для досягнення бажаної консистенції пульпи доводиться спочатку поклади насичувати водою, а потім із значними затратами часу та ресурсів проводити їх зневоднення [96]. Наявні розробки пневматичних забірних пристрій можна згрупувати за принципом дії на ерліфтні та всмоктувальні.

Існує значна кількість конструктивних розробок ерліфтних пристрій 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 газорідинної 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 патрубка (рис. 1.17).

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.

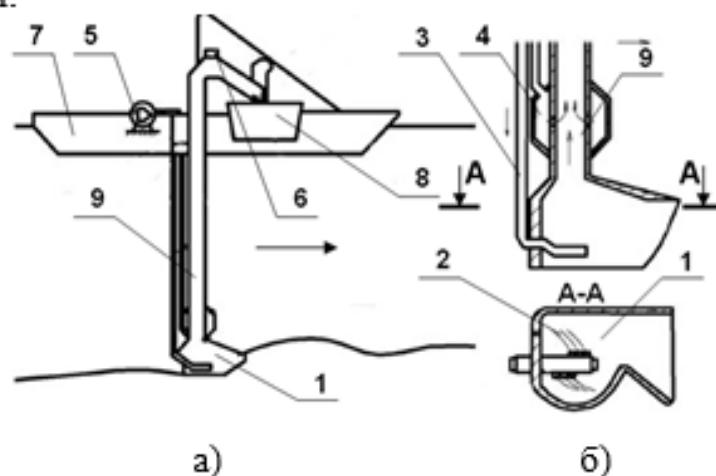


Рис. 1.17. Схема засобу для добування сапропелю а), та ерліфтного забірного пристрою б): 1 – забірник (zmishuvach), 2 – сопла 3, 4 – повітропроводи, 5 – компресор, 6 – повітровідокремлювач, 7 – плавзасіб, 8 – зумпф, 9 – піднімальний трубопровід

Знайшли своє застосування під час добування сапропелів і всмоктувальні забірні пристрої у складі пневматичних камерних насосів [55].

Такі конструктивні розробки (рис. 1.18) 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.

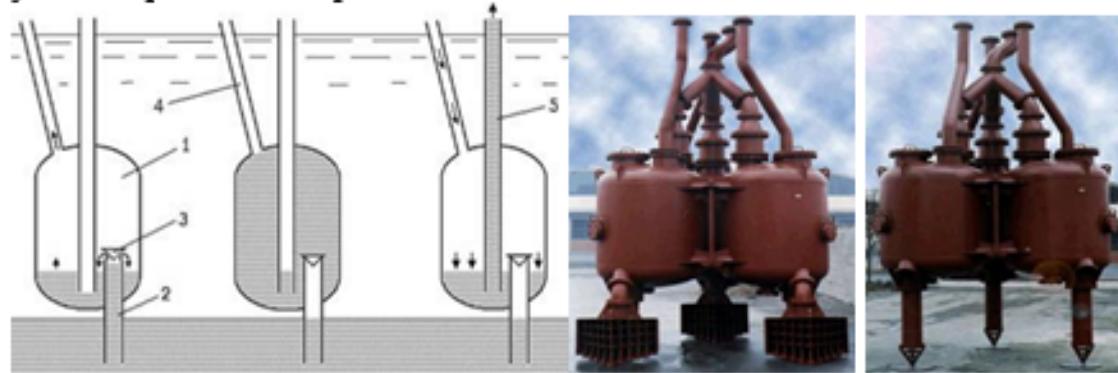


Рис. 1.18. Схема роботи а), та фото пневматичного камерного насоса б):  
1 – робоча камера, 2 – забірний пристрій, 3 – клапан; 4 – труба входу і виходу  
повітря, 5 – вивідний трубопровід

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 пристрій 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 пристрій 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 забірного пристрою роторним вихреутворювачем дозволяє покращити його роботу на покладах підвищеної в'язкості та забруднених рослинними рештками (рис. 1.19).

Аналогічний ефект досягається під час використання всмоктувально-фрезерного забірного 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 пристрій які знайшли своє місце у складі маніпуляторів транспортних систем в різних галузях промисловості і призначені для забору, подачі і транспортування різного роду сипких матеріалів [8, 24, 27, 30, 46, 71, 75, 76, 92,

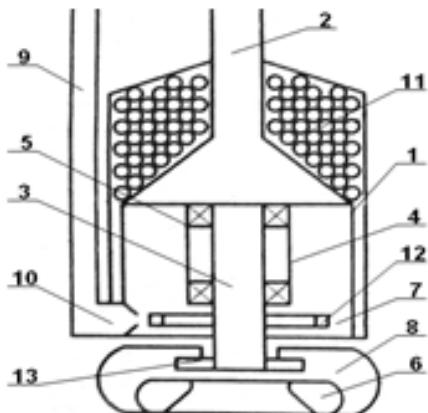


Рис. 1.19. Пневмомеханічний забірний пристрій: 1 – змішувач; 2 – підйомальна труба; 3 – падаюча труба; 4 – стакан; 5 – підшипники; 6 – турбіна; 7 – вихреутворювач; 8 – насадка; 9 – повітряний трубопровід; 10 – сопловий апарат; 11 – перфорований кожух; 12 – підживлююча камера; 13 – канал

Так наприклад, для перевантаження зернових сільськогосподарських матеріалів (рис. 1.20, а), прибирання решток стружки у металообробних цехах (рис. 1.20, б), транспортуванні сухого цементу (рис. 1.20, в), вивантаження чайного листя з трюмів транспортних кораблів (рис. 1.20, г) і ін. використовують саме пневматичні забірні пристрої. Ці забірні пристрої однакові за принципом роботи, але різні за конструкцією та призначенням. Дані пристрої володіють досить високою продуктивністю, основна спільність між ними є регулювальний механізм для подачі повітря.

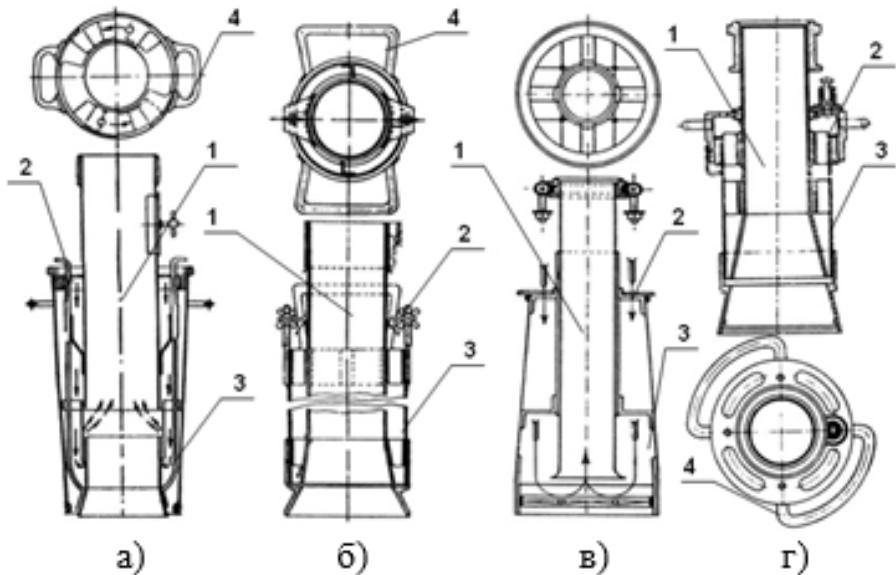


Рис. 1.20. Пневматичні забірні пристрої для сипких та пиловидних матеріалів: 1 – засмоктуюча труба; 2 – регулювальний механізм; 3 – рухомий патрубок; 4 – ручки для підймання і перенесення

Такими чином узагальнюючи результати аналізу засобів для добування сапропелю можна зробити висновок, що з точки зору висунутих вимог найбільш перспективним слід розглядати ерліфтні установки, а їх вдосконалення з умовою пристосування до озерних сапропелевих родовищ дасть очікуваний результат.

#### 1.4. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАБІРНИХ ПРИСТРОЇВ

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

Досягнення необхідної якості роботи забірних пристройів, 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 пристройі спонукає 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 пристройів, 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., Дячков В.К., Фролов А.Г., Пышкин В.П., Кислов Н.В., Бакшанський В.І. і інші [8, 24, 27, 28, 30, 46, 71, 75, 91, 92, 105, 107].

При розрахунку пневматичних транспортуючих пристройів як всмоктуючої так і нагнітаючої дії, визначають наступні їх параметри: внутрішній діаметр транспортного трубопроводу  $d_{\text{об}}$ , необхідну витрату стиснутого повітря  $Q_i$ , повний опір в трубопроводі  $H_{\text{іт}}$ , необхідний тиск повітродувної машини  $P_i$ , довжину транспортування  $L_{\text{об}}$  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

$$\mu_i = \frac{1000 Q_i}{60 Q_i \gamma_i}. \quad (1.4)$$

Звідси витрата повітря  $Q_i$  в першому наближенні визначається на підставі вибраної вагової концентрації суміші  $\mu_i$  і годинної продуктивності установки  $Q_i$  за формулою:

$$Q_i = \frac{1000 \mu_i}{60 \mu_i \gamma_i}, \quad (1.5)$$

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

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

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

або

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

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

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

або

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

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

$$H_{iiai\aa} = I_i + I_{i\aa} + I_{\aa}, \quad (1.10)$$

де  $I_i$  – попутні втрати тиску в трубопроводі з урахуванням втрат у відгалуженнях і перемикачах, Па;

$I_{i\aa}$  – втрати тиску на підйом матеріалу за наявності вертикальних ділянок, Па;

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

У розгорнутому вигляді повний опір визначається формулою:

$$H_{iiai\aa} = \left[ K \mu_n \lambda \frac{\gamma_i v_i^2 L_m}{2 g d_{\partial} \delta} + \gamma'_n \mu_n h + (\chi + \mu) \frac{\gamma_{\aa} \delta v_{\aa}^2}{2 g} \right] \times 10^{-3}, \quad (1.11)$$

де  $K$  – експериментальний коефіцієнт опору;

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

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

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

$$\lambda = \beta / \mu_n, \quad (1.12)$$

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

$$S = \mu_n L_i \delta v_i^2 / d_{\partial}, \quad (1.13)$$

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;

$\gamma_{\text{ex}}$  і  $v_{\text{ex}}$  – питома вага і швидкість повітря на вході в трубопровід при початковому тиску  $D_0$  визначаються за формулами:

$$\gamma_{\hat{d}\delta} = \gamma_i \frac{\dot{I}_i + \dot{I}_i s \ddot{a} + I}{P_0}; \quad (1.14)$$

$$v_{\hat{d}\delta} = \frac{P_0}{H_i + H_i s \ddot{a} + I}. \quad (1.15)$$

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

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

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

$$P_{\delta} = H_i i \hat{d} \delta \ddot{a} + I, \quad (1.17)$$

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);

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

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

$$P_i = \lambda \frac{\gamma v_i^2 L_i \delta}{2 g d_{\delta} \delta} 10^{-3} \leq 0,03 \div 0,05 \text{ Па.} \quad (1.18)$$

Величину загальних втрат тиску в мережі визначають з формули:

$$\sum P_i = \left( \lambda \frac{L_i \delta}{d_{\delta} \delta} + \sum \xi_s \right) \frac{\gamma_i v_i^2}{2g} \left( 1 + K \mu_{\tilde{n}} \right) + \gamma_i \mu_{\tilde{n}} \sum h + \Delta P_{\delta f \zeta} + \sum \Delta P_{i f \hat{a}}, \quad (1.19)$$

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

$L_i \delta$  – приведена довжина трубопроводу, м;

$\sum \xi_s$  – сума коефіцієнтів місцевих опорів, що приймаються для найбільш поширеніх 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;

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

$\Delta P_{\text{ді} \zeta}$  – втрати тиску на розгин, що розраховується по формулі:

$$\Delta P_{\text{ді} \zeta} = K_p \mu \tilde{n} \frac{\gamma_i v_i^2}{2g}, \quad (1.20)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт опору на розгинній ділянці.

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

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

Опір руху аеросуміші в трубопроводі отримуємо з:

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

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

Для ізотермічного процесу:

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

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 навколошнього середовища, К;

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

залежності від схеми руху матеріалу виражається:

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

де  $\sum l_{\hat{a}\hat{a}}$  – 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,  $\text{м}^2$ ;

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

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

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

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

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:

$$P = P_h + P_\delta + P_i + P_m, \quad (1.27)$$

де  $P_i$  – втрати тиску в завантажувальному 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, віднесеної до одиниці площини поперечного трубопроводу

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

де  $\gamma'_n$  – 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 пристройів:

$$P_i = P_{\hat{e}} \sqrt{1 + \frac{\lambda L_{\hat{i}} \delta v_{\hat{i}}^2}{d_{\hat{o}} \delta}}, \quad (1.29)$$

для всмоктуючих пристройів:

$$P_{\hat{e}} = P_i \sqrt{1 - \frac{\lambda L_{\hat{i}} \delta v_{\hat{i}}^2}{d_{\hat{o}} \delta}}, \quad (1.30)$$

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

$\lambda$  – коефіцієнт опору руху чистого повітря;

$d_{\hat{o}\delta}$  – внутрішній діаметр трубопроводу, м.

В результаті вищевикладеного слід відмітити, що науковцями проведени глибокі дослідження роботи пневматичних забірних пристройів, 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, що закономірності для обґрунтування параметрів пневматичних забірних пристройів, 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 органічного 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. Враховуючи органо-мінеральний склад родовищ різних озер сапропель можна використовувати в натуральному вигляді, як добрива або, як сировину на основі якої формують добрива.

2. Більшість відомих забірних пристрій 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 сапропеле-повітряної суміші, придатності до роботи за різних умов 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 засобу для добування сапропелю, що здатний забезпечити виконання висунутих вимог до якості добувних покладів.

4. Недостатньо глибоко розроблені закономірності для обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневматичних забірних пристрій які працюють із в'язкими матеріалами.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз принципів функціонування засобів для добування сапропелю і на цій основі обґрунтувати конструктивну схему та робочий процес засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм;
- розробити математичну модель взаємодії повітряного потоку у середовищі органічного сапропелю;
- встановити залежності максимальної теоретичної продуктивності пневматичного забірного пристрою від технологічних параметрів процесу добування та зміни газовмісту за висотою забірного пристрою;
- дослідити фізичні 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 забірного 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 забірного пристрою із обґрунтованими у результаті дослідження параметрами в складі засобу для добування сапропелю.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ, ЗАСОБУ ДЛЯ ПНЕВМАТИЧНОГО ДОБУВАННЯ САПРОПЕЛЮ

### 2.1. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Обґрунтування параметрів, засобу для пневматичного добування сапропелю 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, якість добутої сировини та відсутність екологічних наслідків. Як підсумок була запропонована нова пневматична технологія та спосіб розробки, а також кілька перспективних конструкцій забірних пристройів, які працюють за однаковим принципом роботи та різні за призначенням, доцільність використання одного з них обґрунтували теоретичними та експериментальними дослідженнями та економічною ефективністю.

Теоретичні дослідження виконувались після глибокого аналізу та синтезу 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 комплексних досліджень стало обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневматичного забірного пристрою, на основі яких сконструйовано та виготовлено його дослідний зразок а також проведені випробування у виробничих умовах.

Випробування пневматичного 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. Аргументованими позитивними результатами стало визначення продуктивності засобу з застосуванням математичного методу планування експерименту, яка в порівнянні з механічними та гідромеханічними аналогами зменшує собівартість добування і підвищує якість сировини. Також позитивом можна вважати простоту конструкції, низькі енергетичні витрати, високі показники екологічності та низьку металомісткість, майже всі елементи конструкції можливо виконувати з полімерних матеріалів.

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.

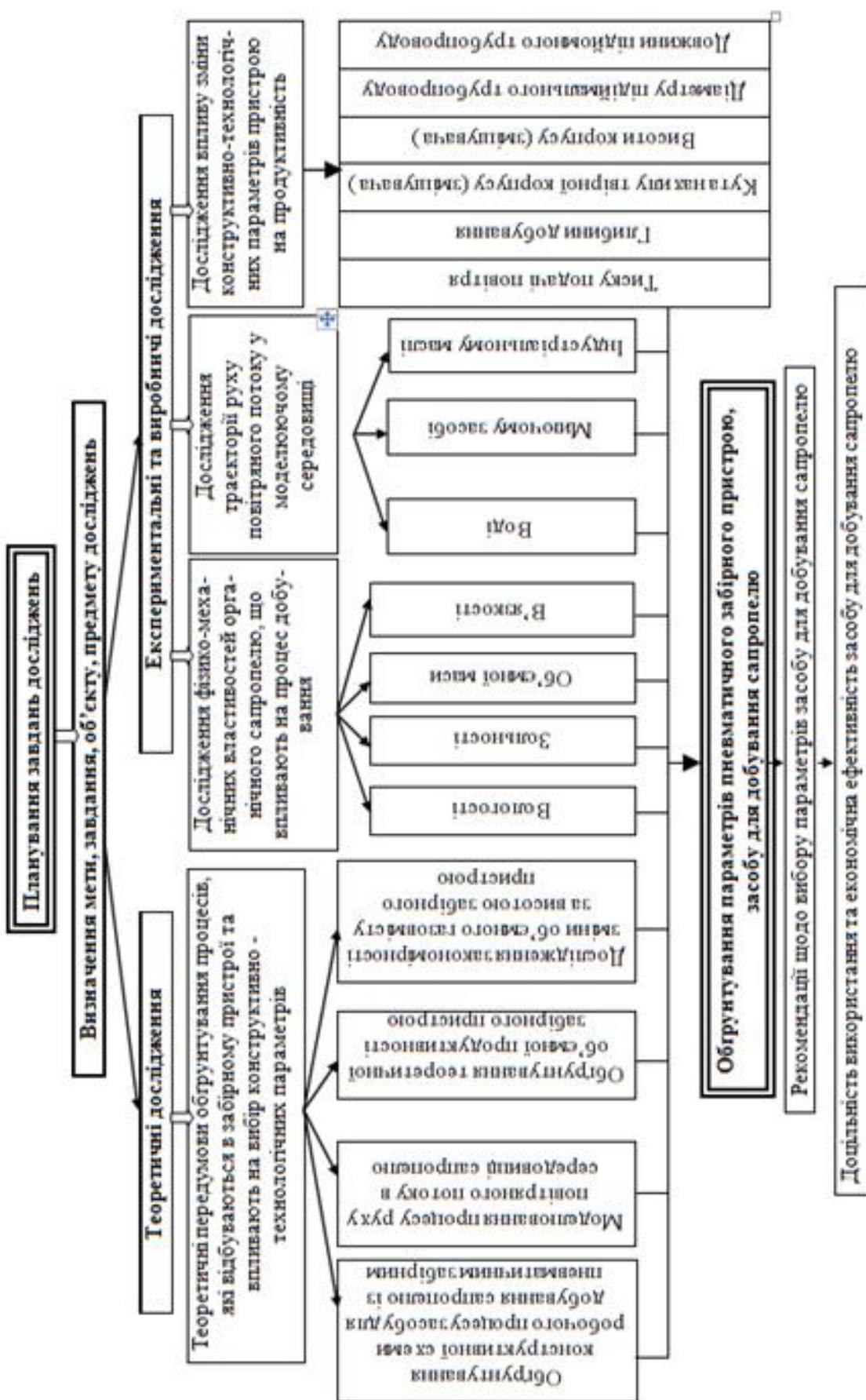


Рис 2.1. Схема планування реалізації досліджень

## 2.2. ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНОЇ СХЕМИ ЗАБІРНОГО ПРИСТРОЮ ТА ЗАСОБУ ДЛЯ ПНЕВМАТИЧНОГО ДОБУВАННЯ САПРОПЕЛЬЮ

Найбільш перспективним з точки зору мінімізації, простоти конструкції 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 забірного пристрою, що входить до складу засобу для добування сапропелю, призначеного для забезпечення сільського господарства якісною органічною сировиною для формування добрив, а також відновлення та збереження озер без нанесення екологічних наслідків – являється альтернативною розробкою. Основні аспекти роботи даного засобу базуються на використанні енергії стисненого повітряного потоку.

Запропонована конструкція забірного пристрою (рис. 2.2) дозволяє добувати поклад природної вологості, чим заощаджує на власних енерговитратах витратах та на зневоднення, а також забезпечує інтенсифікацію процесу при цьому не впливає на порушення екосистеми водойми.

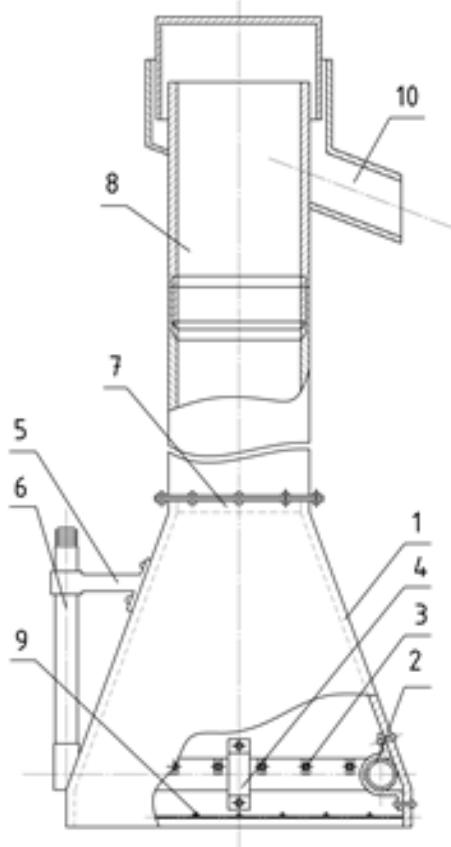


Рис. 2.2. Схема пневматичного забірного пристрою: 1 – корпус; 2 – напірний повітропровід з соплами 3; 4, 5 – кронштейни; 6 – магістраль подачі повітря; 7 – вихідне вікно; 8 – піднімальний трубопровід; 9 – захисна решітка; 10 – розподільчий вивідний рукав

Суть роботи даного забірного пристрою 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.

Даний забірний пристрій складається з забірної частини в зборі – змішувача, призначеного для розрихлення та забору середніх і нижніх шарів сапропелю; змінного по довжині піднімального трубопроводу 8 – для транспортування даних покладів до надводної поверхні; розподільчого вивідного рукава 10 – для спрямування покладів до приймального бункера поплавкового механізму транспортування сапропелів до берега, та 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 забірний пристрій оснащений переходним фланцем (вихідне вікно) 7, захисною решіткою 9 та кронштейнами 4, 5, відповідно якими кріпиться кільцевий напірний повітропровід та магістраль подачі повітря 6.

Робота пристрою для добування сапропелю заключається в наступному. Під час вертикального занурювання маніпулятором забірного пристрою в підводні родовища, верхній (пелоген), а потім і середній шар сапропелю заповнює порожнину корпуса. Стиснute повітря, що подається від компресора до магістралі подачі повітря потрапляє до кільцевого напірного повітропроводу і виходить через сопла, де формує двофазне середовище. За рахунок даного процесу, поклади сапропелю розбиваються на окремі шматки. Пневмозріджений потік направляється до вихідного вікна з якого потрапляє до піднімального трубопроводу, а перетинаючи зону переходу корпусу у піднімальний трубопровід розподіляється по окремим фазам повітря та сапропель.

Щодо стиснутого повітря, воно потрапивши до підймального трубопроводу заповнює його переріз та рухається вертикально у вигляді снаряду до надводної поверхні. Щодо сапропелю то його певний об'єм (пробку), штовхає перед собою даний снаряд стиснутого повітря. А знаходиться сапропель попереду снаряду повітря за рахунок потрапляння у трубопровід під час занурення.

Формування пробки відбувається потоком повітря (бульбашками) у зоні переходу змішувача у піднімальний трубопровід. Бульбашки повітря виконують роботу розрихлення, забору та піднімання покладів, а потім об'єднуються у снаряд. Процес піднімання пробок сапропелю снарядами стиснутого повітря відбувається періодично. Таким чином відбувається

піднімання сапропелю до розподільчого вивідного рукава, який забезпечує розділення фаз повітря і сапропелю та спрямовує останній у бункера пневматичного транспортера. Захисна решітка призначена для унеможливлення забивання корпусу пристрою сторонніми предметами різного походження. Для подовження підйомального трубопроводу передбачено відрізки труб, що монтуються за допомогою різьбових з'єднувальних кінців або муфт, оскільки глибина добування поступово збільшується. В результаті даних процесів відбувається добування сапропелю до надводної поверхні.

Відповідно до складу пневматичного засобу для добування сапропелю слід віднести: плавзасіб, забірний пристрій (рис. 2.2), механізм транспортування сапропелів до берега, джерело енергії, компресор з двома вихідними золотниками та маніпулятор (рис. 2.3). Для транспортування сапропелів до берега також можна використовувати баржу, але це здорожчує добувний процес оскільки появляється додаткова розвантажувальна операція.

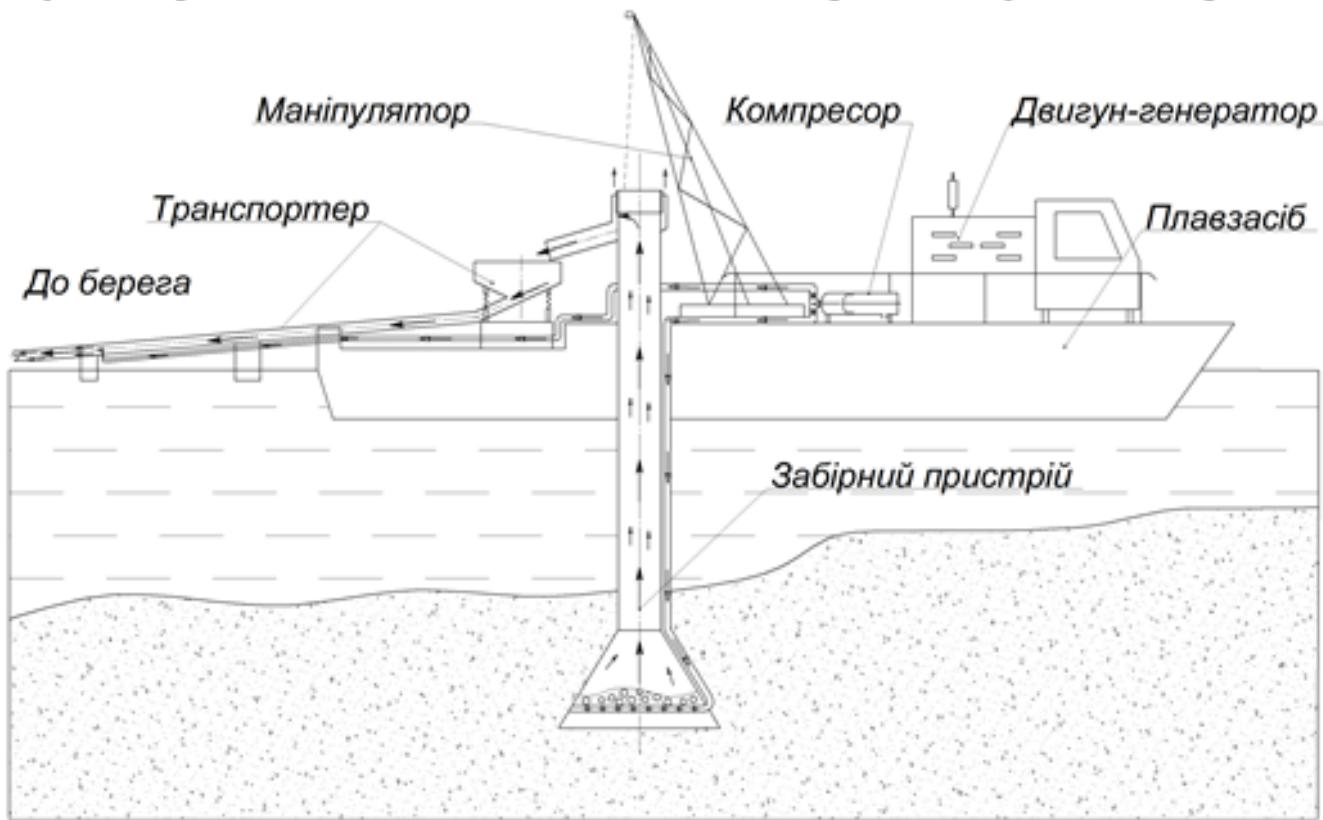


Рис. 2.3. Схема пневматичного засобу для добування сапропелю

В свою чергу механізм транспортування добутих сапропелів з підводних родовищ до берега інакше поплавковий пневматичний транспортер складається з рамного приймального вібробункера, транспортуючого трубопроводу, ежекторного пристрою та підтримуючих поплавків.

Вібробункер призначений для постійного заповнення свіжодобутим сапропелем початкового відрізу похилого трубопроводу-транспортера. Даний відрізок трубопроводу знаходиться під нахилом на відстані між бункером та ежектором.

Ежекторний пристрій встановлений у місці переходу транспортуючого трубопроводу з похилого положення у горизонтальне, тобто зона контакту трубопроводу з водним дзеркалом та призначений для штовхання сапропелю, який потрапляє з бункера до трубопроводу за допомогою вібрації.

Виконання бункера вібраційним дає можливість безперебійно подавати сапропель по похилому трубопроводі до ежектора, чим забезпечується унеможливлення втрат стиснутого повітря, що виходить з сопла ежектора.

Застосування пневматичного транспортування добутих сапропелів до берега на зміну транспортування баржою, знижує енергетичні витрати, дає можливість вести розробки покладів на необмежених відстанях від берега, а також підвищує технологічну ефективність засобу вцілому.

Як результат на основі засобу для добування сапропелю та запропонованої технології такий процес можна назвати – пневматичним добуванням.

Добування сапропелів з підводних родовищ відбувається папільонажно-воронковим або траншейним методом розробки з під шару пелогену, що унеможливлює збочтування та забруднення водного дзеркала. Подальші переміщення забірного пристрою відбуваються в середовищі покладів, без взаємодії з водою.

На основі запропонованої пневматичної технології створені енергоощадні перспективні конструкції забірних пристрій, які не несуть за собою негативних наслідків для навколошнього середовища, здатні добувати сапропелі природної вологості, мають високу продуктивність, малу операційність, прості елементи конструкції, не мають механічних елементів приводу та пристосовані до розробки будь-яких сапропелевих родовищ з під шару води.

### 2.3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ЗАБІРНОГО 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 (zmішувача) у циліндричний піднімальний трубопровід. Тому при аналізі робочого процесу забірного 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 забірного пристрою для добування сапропелю, відповідно до рис. 2.2, під час його роботи із бульбашковою та снарядною структурами висхідного руху повітряносапропелей 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 та різним об'ємом, бульбашки постійно наздоганяють одну одну, стикаються і зливаються, внаслідок чого спостерігається зростання крупніших бульбашок. В результаті, розмір бульбашок збільшується настільки, що поперечний перетин однієї або декількох бульбашок наближається до поперечного перетину каналу вивідного вікна (кінцева частина конічного корпусу 4. початок піднімального

трубопроводу 5). Таким чином, встановлення саме конічного корпусу забезпечує перехід бульбашкового режиму руху двофазного середовища в снарядний незалежно від початкового розміру бульбашок.

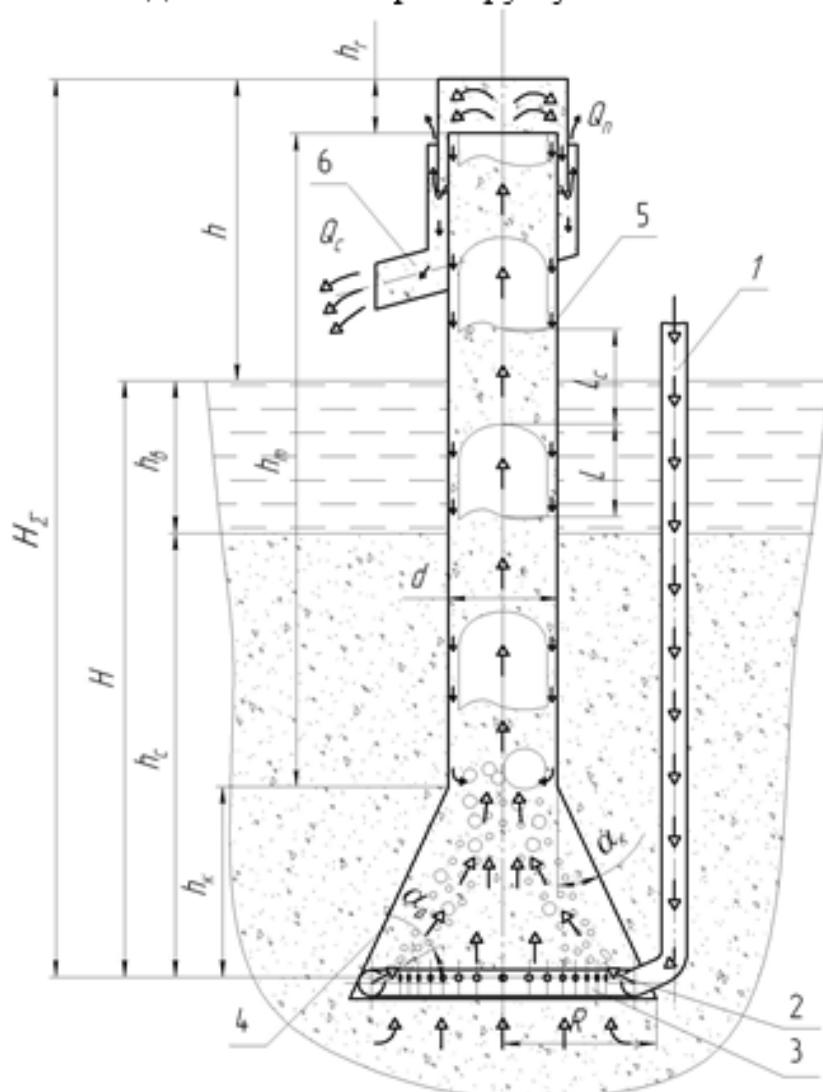


Рис. 2.3. Схема робочого процесу пневматичного забірного пристрою із бульбашкою та снарядною структурами повітряно-сапропелевого потоку:  
1 – магістраль подачі повітря; 2 – сопла; 3 – кільцевий напірний повітропровід;  
4 – корпус; 5 – піднімальний трубопровід; 6 – розподільний вивідний рукав

За розглядуваного режиму руху повітряносапропелевої 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 підіймання повітря через центральну частину піднімального 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 засобу для добування сапропелю (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 повітряносапропелевої 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 повітряносапропелевої суміші. Коли тривалість такого процесу прямує до нуля, то у конічній частині відбувається лише перемішування суміші та додаткове її насичення повітрям (зростає газовміст), що сприяє пуску засобу. За більшої тривалості процесу і досягненні газовмісту значення близького до  $\phi_n=1$  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 забірного 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  $\alpha(h)$  (потоку 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 газовмісту  $\phi_n < 0,2 \dots 0,3$ . Такі висновки повністю узгоджуються із наведеною схемою (рис. 2.3), оскільки зменшення площини поперечного перерізу конічного корпусу змішувача із його висотою призводитиме до зростання газовмісту і за  $\phi_n > 0,2 \dots 0,3$  бульбашковий режим руху буде переходити у снарядний. Розташування зони зміни режиму руху буде залежати від початкового значення об'ємного газовмісту та геометричних параметрів конічного корпусу змішувача. Доцільність існування бульбашкового режиму руху повітряносапропелей суміші у конічному корпусі обґрунтovується необхідністю подрібнення волокнистої структури покладів сапропелю з метою зниження опору на підймання. Особливо це стосується сапропелю органічного типу із пониженою вологістю.

Залежність, яка пов'язує сумарна геометрична довжина пневматичного забірного пристрою (рис. 2.3) із характеристиками озера з родовищем сапропелю має вигляд:

$$h + I = h_s + h_\delta + h_r = h + h_{\bar{a}} + h_{\bar{n}} = H_S, \quad (2.2)$$

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;  
 $h_{\tilde{n}}$  – товщина шару сапропелю з під якого ведеться добування, м;  
 $h_r$  – висота розташування вивідного розподільчого рукава над піднімальним трубопроводом, м;  
 $H_x$  – габаритний розмір пристрою, м.

За снарядної структури повітряносапропелевої суміші, яка може існувати коли об'ємний газовміст знаходиться в межах  $0,2 \dots 0,3 < \varphi_n < 0,6 \dots 0,8$  [50], потік рухається з приведеною швидкістю  $v_{\text{н}}(h)$ . 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 почергово. У пристинній плівці відбувається зворотній рух сапропелю із швидкістю  $v'_n(h)$ .

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

$$\alpha_s = \frac{\dot{I}}{\dot{I} + h} = \frac{h_a + h_{\tilde{n}}}{h_a + h_\delta + h_r}, \quad (2.3)$$

Даний показник для існування бульбашкового та снарядного режимів руху газорідинної суміші повинен знаходитись у межах  $0,4 < \alpha_s < 1,0$ , тобто за даним показником не можна визначити межу в існуванні поєднаних між собою 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 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 можна вважати правильний вибір геометрично-конструктивної побудови корпусу пристрою, а також будемо використовувати його об'ємний газовміст, та вважатимемо межею значення  $\varphi_n=0,2 \dots 0,3$ .

## 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 повітропроводу супроводжується формуванням повітряного потоку (струменю) високого тиску, який взаємодіє із масою сапропелю, а саме розрихлює поклади та подрібнюється на окремі одиничні бульбашки різного об'єму. Даний потік, піднімаючись у висхідному напрямку, розширюється, утворюючи повітряносапропелеву 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).

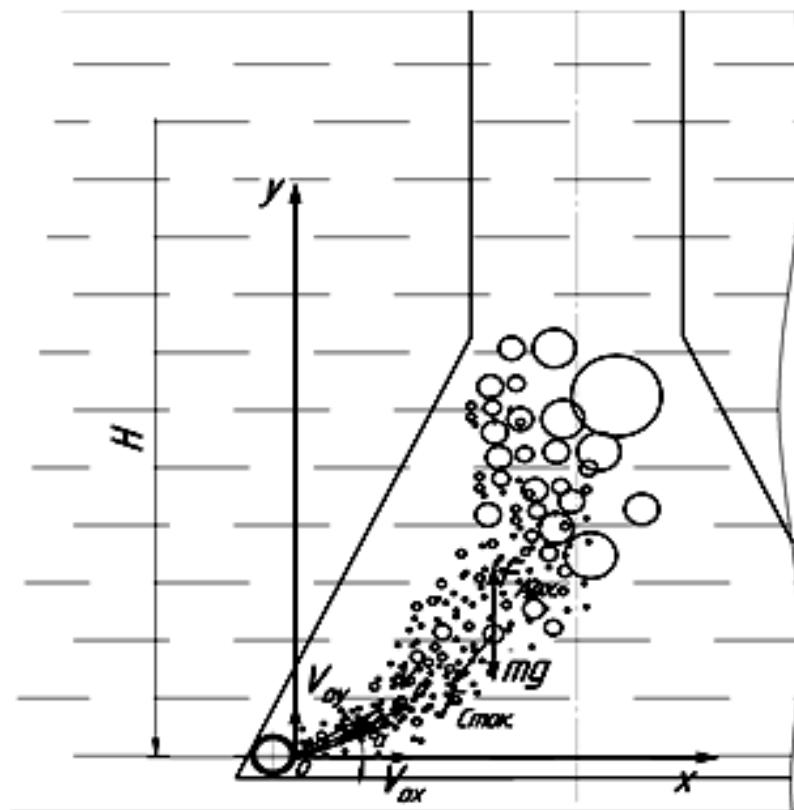


Рис. 2.4. Розрахункова схема руху бульбашок повітря у середовищі сапропелю

З врахуванням вище наведеного на бульбашку діють наступні сили:

- сила ваги  $mg$ ;
- виштовхувальна сила Архімеда  $F_{Arх}$ ;
- сила лобового опору (сила Стокса)  $F_{Стокс}$ .

Відповідно до формулі Бернуллі тиск повітря в бульбашці становить:

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

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

$\rho$  – густина сапропелю, кг/м<sup>3</sup>;

$y$  – 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, м/с;

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

Відповідно до формулі 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,  $\mu = 0,029$  кг/моль;

$R$  – універсальна газова стала,  $R = 8,31$  Дж/моль·К;

$T$  – абсолютна температура бульбашки, К.

Підставивши (2.4) в (2.5) отримаємо:

$$V = \frac{2 \cdot m \cdot R \cdot T}{\mu \cdot (2 \cdot P_{\text{atm}} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2))} \quad (2.6)$$

Виштовхувальна сила Архімеда дорівнює:

$$F_{\text{Arch}} = \rho \cdot g \cdot V. \quad (2.7)$$

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

$$F_{\text{Arch}} = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \rho \cdot R \cdot T}{\mu \cdot (2 \cdot P_{\text{atm}} + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \rho \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2))} \quad (2.8)$$

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

$$F_{\text{Stock}} = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_a \cdot v, \quad (2.9)$$

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 степеневої 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:

$$F_{\text{Ноб}} = -6 \cdot \pi \cdot q \cdot v^{1-b} \cdot r_a. \quad (2.11)$$

Радіус  $r_a$  повітряної кульки з урахуванням (2.6) дорівнює

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

У такому випадку сила лобового опору Стокса дорівнює:

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

Відповідно до II закону Ньютона отримаємо:

$$m\ddot{a} = m\ddot{g} + \vec{F}_{\text{Аб}} + \vec{F}_{\text{Ноб}} \quad (2.14)$$

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

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

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

$$m = \frac{\mu P_{\text{аб}} V_0}{R T} \quad (2.16)$$

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

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

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:

$$\begin{cases} x_0 = 0; \\ \dot{x}_0 = v_{ox}; \\ \dot{y}_0 = v_{oy}; \\ \dot{\dot{y}}_0 = 0; \end{cases} \quad (2.18)$$

За початкову швидкість повітряної бульбашки  $v_o$  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].

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

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

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

$\rho_{if}$  – густина повітря,  $\text{kg/m}^3$ ;

$P_{if}$  – 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

$$P_{if} = P_{ad} + \rho \cdot g \cdot H. \quad (2.20)$$

Тому формула (2.19) набуде вигляду:

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

Проте, швидкість газу зростає зі зростанням різниці тисків  $P_{adi}$  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

$$\beta_{es} = P_{adi}/P_i = 0,528, \quad (2.22)$$

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

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

де  $T_i$  – температура за якої знаходиться стиснute 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 отвору напірного трубопроводу від горизонтали, 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 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 отвору 0,05...0,20 м не перевищує 10 – 12 %. Хоча відхилення між цими значеннями у діапазоні віддалей від вихідного отвору 0...0,05 м є вищими і досягають 20...25 %. Оскільки адекватність математичної моделі у вигляді системи диференційних 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 забірного пристрою  $H = 4$  м.

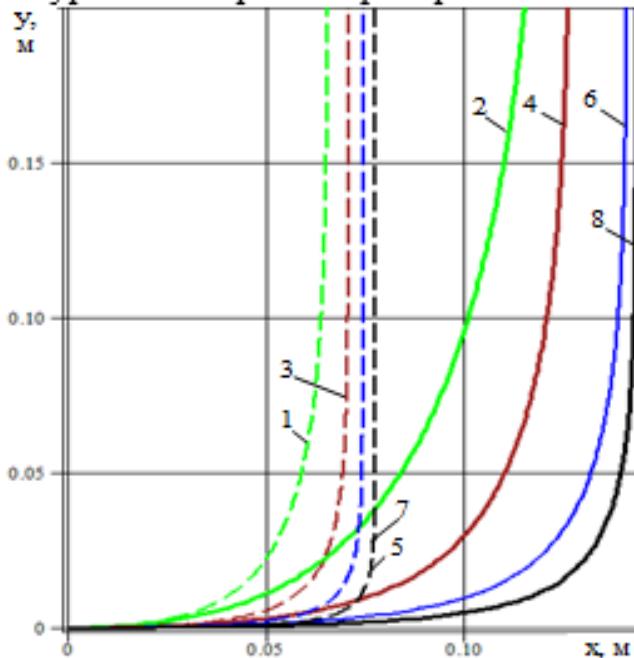


Рис. 2.5. Форма меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із горизонтального отвору діаметром 1,0 мм за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3- 4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

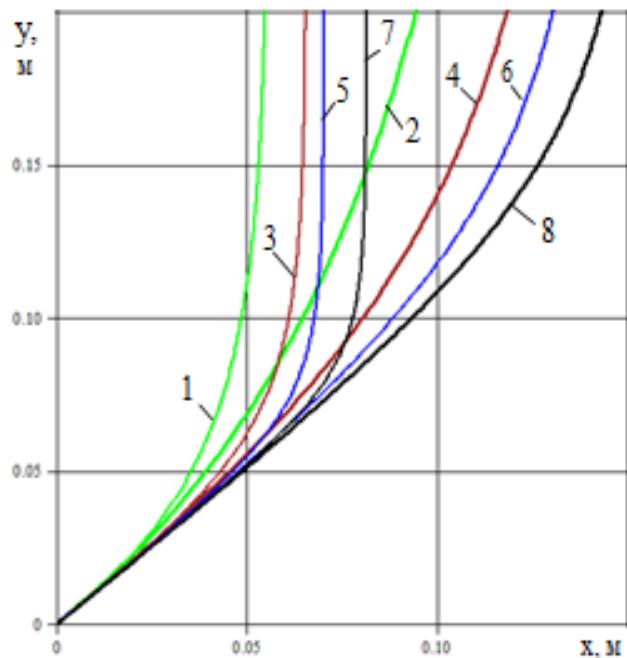


Рис. 2.6. Форма меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із отвору діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на  $45^0$  за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

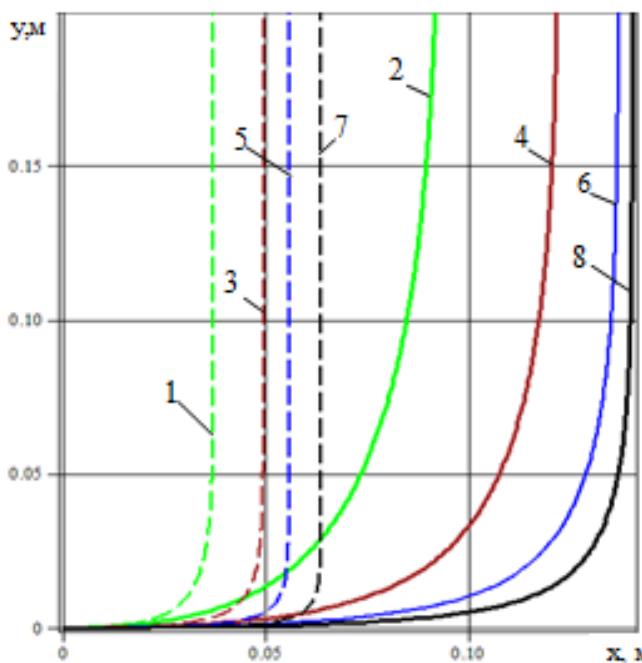


Рис. 2.7. Форма меж повітряного потоку під час його руху у маслі індустріальному після виходу із горизонтального отвору діаметром 1,0 мм за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

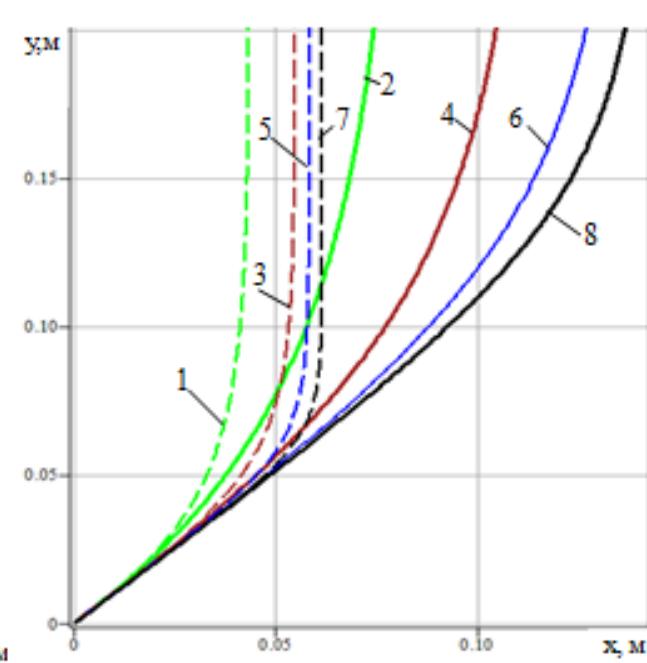


Рис. 2.8. Форма меж повітряного потоку під час його руху у маслі індустріальному після виходу із отвору діаметром 1,0мм відхиленого від горизонту на  $45^0$  за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

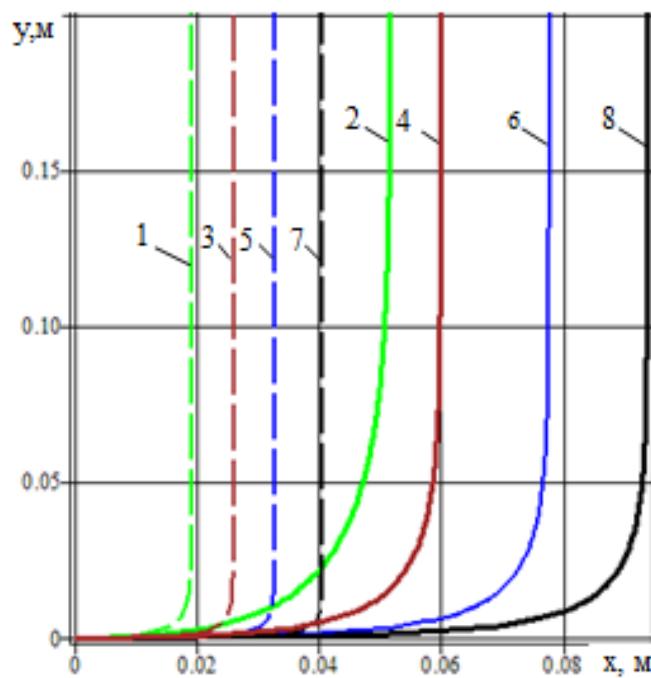


Рис. 2.9. Форма меж повітряного потоку під час його руху у миючому засобі після виходу із горизонтального отвору діаметром 1,0мм за тиску подачі: 1-2 – 200кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

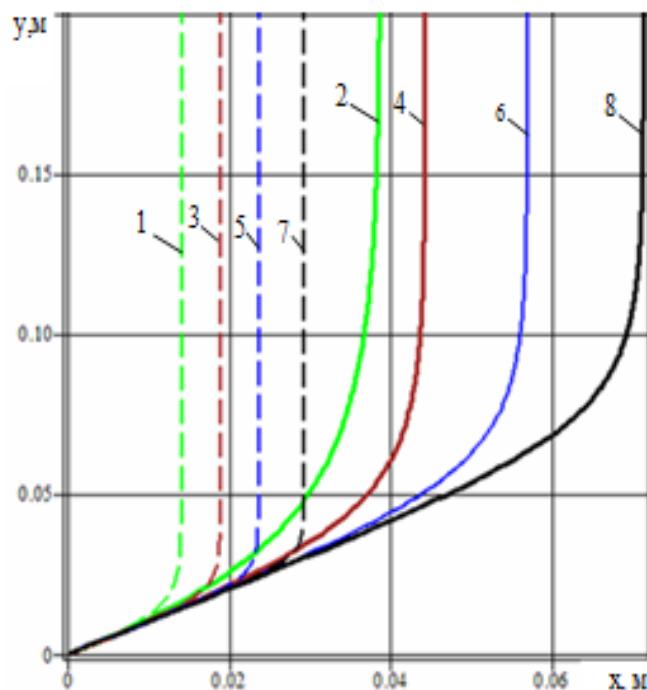


Рис. 2.10. Форма меж повітряного потоку під час його руху у муючому засобі після виходу із отвору діаметром 1,0мм відхиленого від горизонту на  $45^0$  за тиску подачі: 1-2 – 200кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

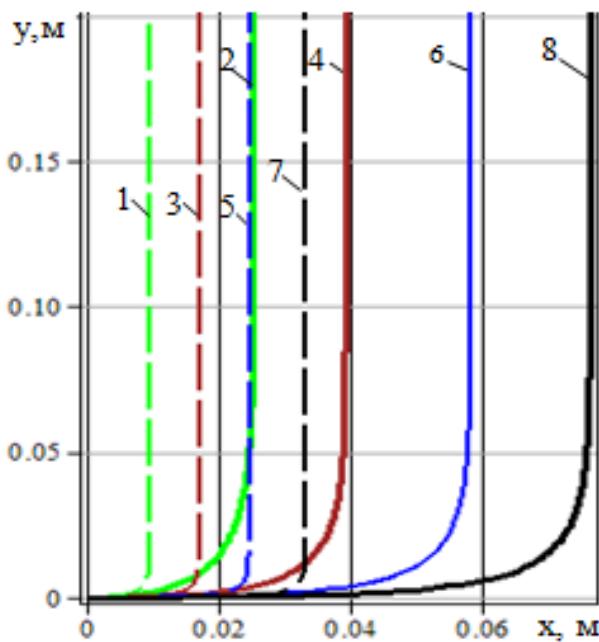


Рис. 2.11. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_f=95\%\pm 1$  після виходу із горизонтального отвору діаметром 1,0 мм заглибленого на 4 м за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

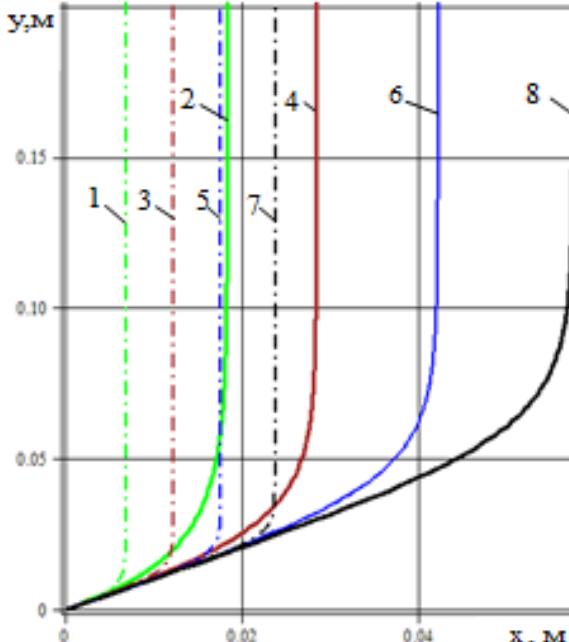


Рис. 2.12. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_f=95\%\pm 1$  після виходу із отвору діаметром 1,0 мм заглибленого на 4 м та відхиленого від горизонту на  $45^0$  за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа;

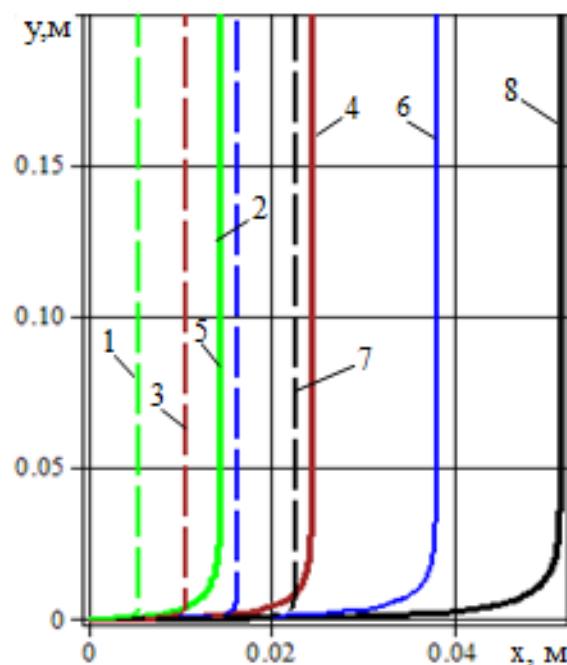


Рис. 2.13. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_J=90\%\pm 1$  після виходу із горизонтального отвору діаметром 1,0 мм заглибленого на 4м за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

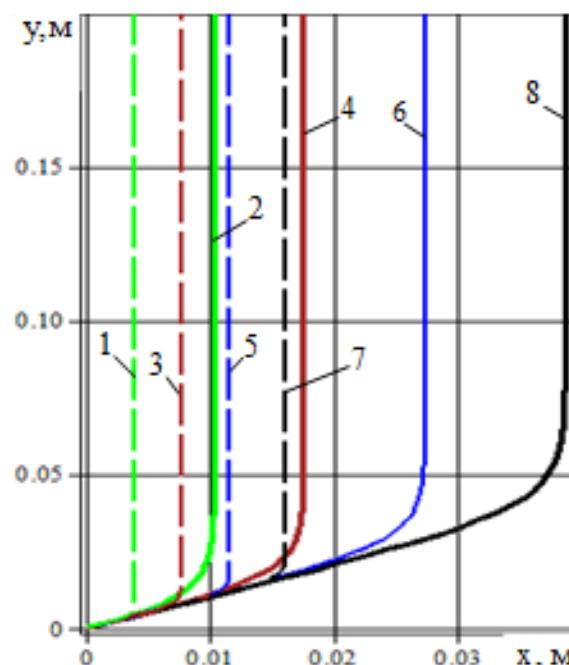


Рис. 2.14. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_J=90\%\pm 1$  після виходу із отвору діаметром 1,0 мм заглибленого на 4м та відхиленого від горизонту на  $45^0$  за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

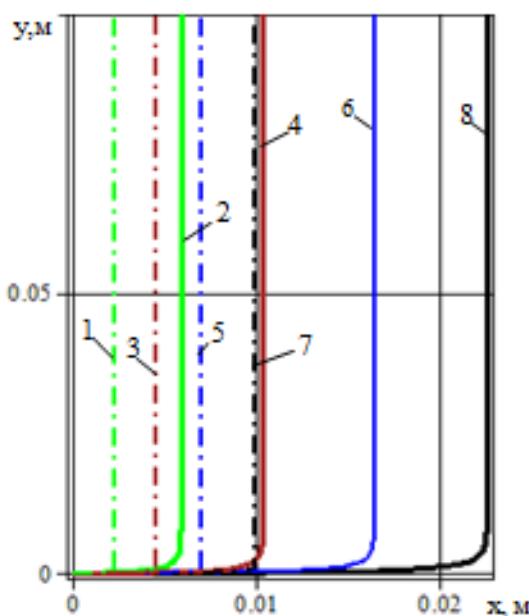


Рис. 2.15. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_J=85\%\pm 1$  після виходу із горизонтального отвору діаметром 1,0 мм заглибленим на 4 м за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

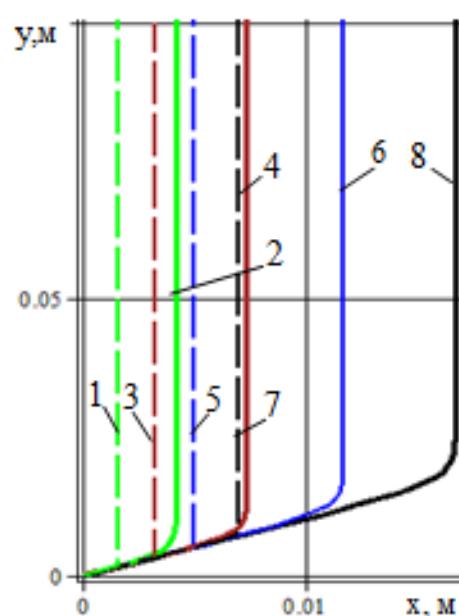


Рис. 2.16. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_J=85\%\pm 1$  після виходу із отвору діаметром 1,0 мм заглибленим на 4 м та відхиленого від горизонту на  $45^0$  за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

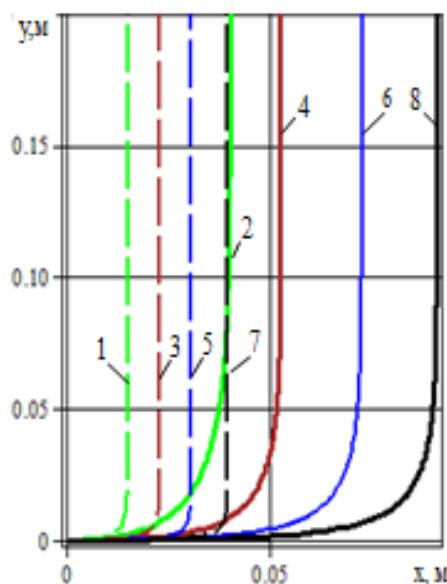


Рис. 2.17. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_I=95\% \pm 1$  після виходу із горизонтального отвору діаметром 1,0мм заглибленого на 2 м за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

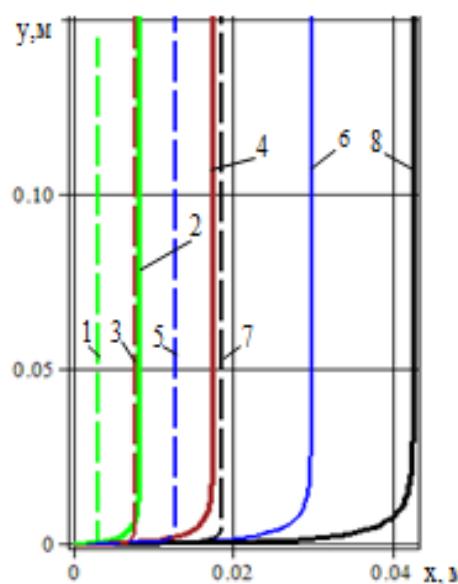


Рис. 2.18. Форма меж повітряного потоку під час його руху у сапропелі вологістю  $W_I=95\% \pm 1$  після виходу із горизонтального отвору діаметром 1,0 мм заглибленим на 6 м за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 400 кПа; 7-8 – 500 кПа

Також для аналізу впливу глибини занурення забірного 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 отвору із  $0^\circ$  до  $45^\circ$  в усьому досліджуваному діапазоні решти факторів забезпечує зниження проникнення повітряного потоку в сапропель в межах 0,002...0,01 м, 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 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 забірного пристрою на 2 м призводить до зменшення координати  $x$  поширення повітряного потоку у межах 0,005...0,012 м.

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

## 2.5. ОБГРУНТУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ ОБ'ЄМНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ЗАБІРНОГО ПРИСТРОЮ ЗАСОБУ ДЛЯ ДОБУВАННЯ САПРОПЕЛЮ

Оскільки першочерговість процесу формування двокомпонентного середовища відбувається в змішувачі забірного 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 траекторією 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 забірного 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 вхідного сопла змішувача становитиме:

$$D = D_{\text{аэ}} + \bar{\rho}_n \cdot g \cdot (H - y), \quad (2.26)$$

де  $\bar{\rho}_n$  – усереднена за глибиною  $H$  густина сапропелю,  $\text{kg/m}^3$ .

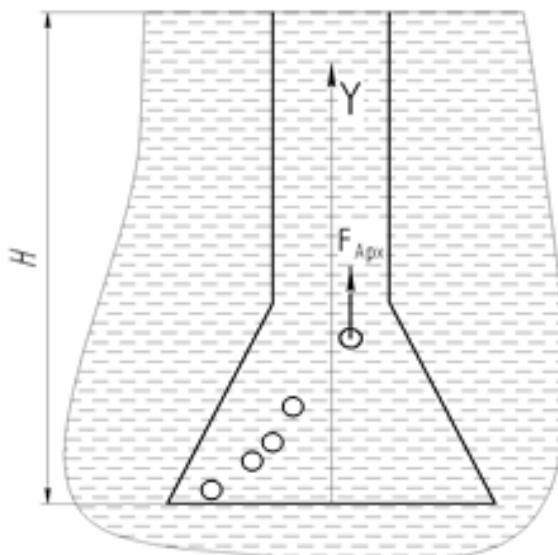


Рис. 2.19. Розрахункова схема щодо визначення теоретичної об'ємної продуктивності забірного пристрою засобу для добування сапропелю

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

$$F_{\text{Apx}} = \frac{D_{\text{аэ}} \cdot \bar{\rho}_n \cdot g \cdot V_0}{D_{\text{аэ}} + \bar{\rho}_n \cdot g \cdot (H - y)}. \quad (2.27)$$

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

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

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

$$\begin{aligned} A_{Apx} &= \int_0^H \frac{D_{ab} \cdot \bar{\rho}_n \cdot g \cdot V_0}{D_{ab} + \bar{\rho}_n \cdot g \cdot (H - y)} dy = D_{ab} \cdot \bar{\rho}_n \cdot g \cdot V_0 \int_0^H \frac{dy}{D_{ab} + \bar{\rho}_n \cdot g \cdot H - \bar{\rho}_n \cdot g \cdot y} = \\ &= D_{ab} \cdot V_0 \cdot \ln\left(\frac{D_{ab} + \bar{\rho}_n \cdot g \cdot H}{D_{ab}}\right) = D_{ab} \cdot V_0 \cdot \ln\left(1 + \frac{\bar{\rho}_n \cdot g \cdot H}{D_{ab}}\right). \end{aligned} \quad (2.29)$$

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

$$A = \rho_c \cdot V_c \cdot g \cdot H - \bar{\rho}_n \cdot V_c \cdot g \cdot H = (\rho_c - \bar{\rho}_n) \cdot V_c \cdot g \cdot H. \quad (2.30)$$

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:

$$A = (30,449 \cdot I + 985,37 - \bar{\rho}_n) \cdot V_c \cdot g \cdot H. \quad (2.31)$$

Прирівнюючи (2.29) та (2.31) отримаємо:

$$V_c = \frac{D_{ab} \cdot V_0}{(30,449 \cdot I + 985,37 - \bar{\rho}_n) \cdot g \cdot H} \ln\left(1 + \frac{\bar{\rho}_n \cdot g \cdot H}{D_{ab}}\right) \quad (2.32)$$

Залежність (2.32) виражає максимальну можливий об'єм сапропелів  $V_c$ , який може підняти з глибини  $H$  бульбашка повітря, об'єм якої за атмосферного тиску  $P_{atm}$  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 забірного пристрою становитиме:

$$V_{\Sigma c} = \frac{D_{ab} \cdot Q_{nv}}{(30,449 \cdot I + 985,37 - \bar{\rho}_n) \cdot g \cdot H} \ln\left(1 + \frac{\bar{\rho}_n \cdot g \cdot H}{D_{ab}}\right). \quad (2.33)$$

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].

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

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

З урахуванням площин 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:

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

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

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

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

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

Дана нерівність не дозволяє точно визначити продуктивність забірного 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).

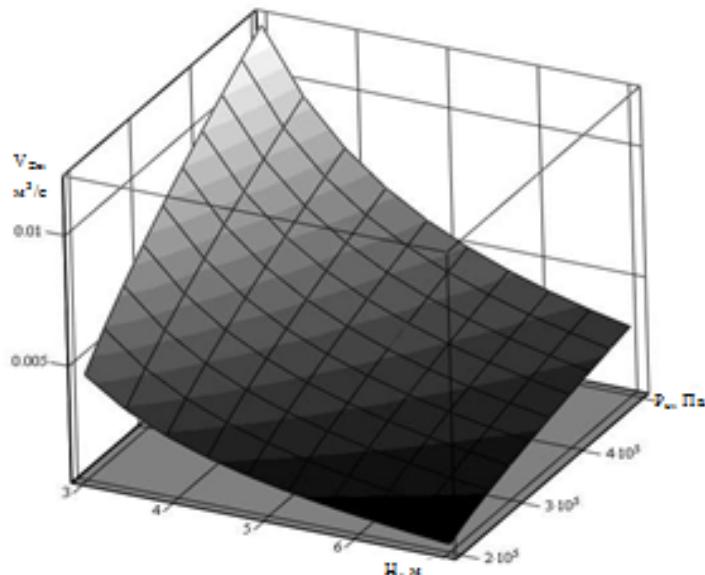


Рис. 2.20. Залежність максимальної теоретичної продуктивності  $V_{\Sigma c}$  забірного пристрою від глибини добування  $H$  та тиску подачі повітря  $P_i$

Побудована графічна залежність вказує на те, що для досягнення максимальної продуктивності забірного 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  $P_t = 400 \dots 450$  кПа.

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 зростанням вартості та затрат на експлуатацію.

## 2.6. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ОБ'ЄМНОГО ГАЗОВМІСТУ ЗА ВИСОТОЮ ЗМІШУВАЧА ЗАБІРНОГО ПРИСТРОЮ

Як зазначалось у п. 2.2 основною характеристикою, яка визначає перехід бульбашкового режиму руху газорідинної суміші є об'ємний газовміст, який розраховують за формулою (2.1). Також з аналізу процесу формування газорідинної суміші у змішувачі (конічному корпусі) забірного 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 забірного пристрою розглянемо деяке довільне січення повітряно-сапропелевої суміші висотою  $\Delta h \rightarrow 0$  розташоване на віддалі  $y_i$  від осей вихідних отворів кільцевого напірного повітропроводу (рис. 2.21).

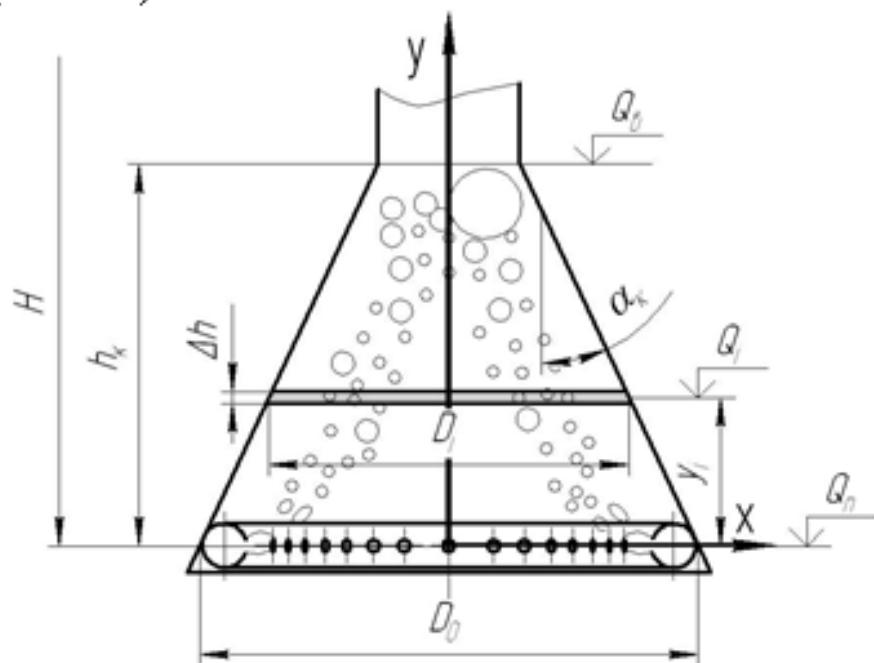


Рис. 2.21. Схема до визначення закономірності розподілу об'ємного газовмісту за висотою змішувача забірного пристрою.

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

$$\varphi_h(y_i) = \frac{S_{ifa}(y_i)}{S_z(y_i)}, \quad (2.39)$$

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

$S_z(y_i)$  – сумарна площа розглядуваного перерізу,  $\text{m}^2$ .

Сумарна площа становить:

$$S_z(y_i) = \pi \cdot f^2(y_i), \quad (2.40)$$

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

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

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

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

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

Тоді

$$S_x(y_i) = \pi \cdot \left( \frac{D_0}{2} - y_i \cdot \operatorname{tg} \alpha_i \right)^2. \quad (2.42)$$

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

$$Q_{im} = Q_{dm} = Q_m, \quad (2.43)$$

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

$Q_{dm}$  – масова витрата повітря через вихідний отвір конічного корпусу забірного пристрою, кг;

$Q_m$  – масова витрата повітря через виділений переріз, кг,

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

$$Q_{iv}(y_i) = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T_i \cdot P_i^2}}{4 \cdot \mu \cdot (D_{\text{ао}} + \rho_{\text{н}} \cdot g \cdot (H - y_i))}. \quad (2.44)$$

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

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

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:

$$S_{\text{ітд}}(y_i) = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T_i \cdot P_i^2}}{4 \cdot \mu \cdot (D_{\text{ао}} + \rho_{\text{н}} \cdot g \cdot (H - y_i)) \cdot v_y(y_i)}. \quad (2.46)$$

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

$$\varphi_h(y) = \frac{n \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot R \cdot T_i \cdot P_i^2}}{4 \cdot \mu \cdot (D_{\text{ао}} + \rho_{\text{н}} \cdot g \cdot (H - y)) \cdot v_y(y) \cdot \left( \frac{D_0}{2} - y \cdot \operatorname{tg} \alpha_i \right)^2}. \quad (2.47)$$

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 забірного пристрою на зміну об'ємного газовмісту у середовищі Maple були побудовані графічні залежності даного параметра (рис. 2.22).

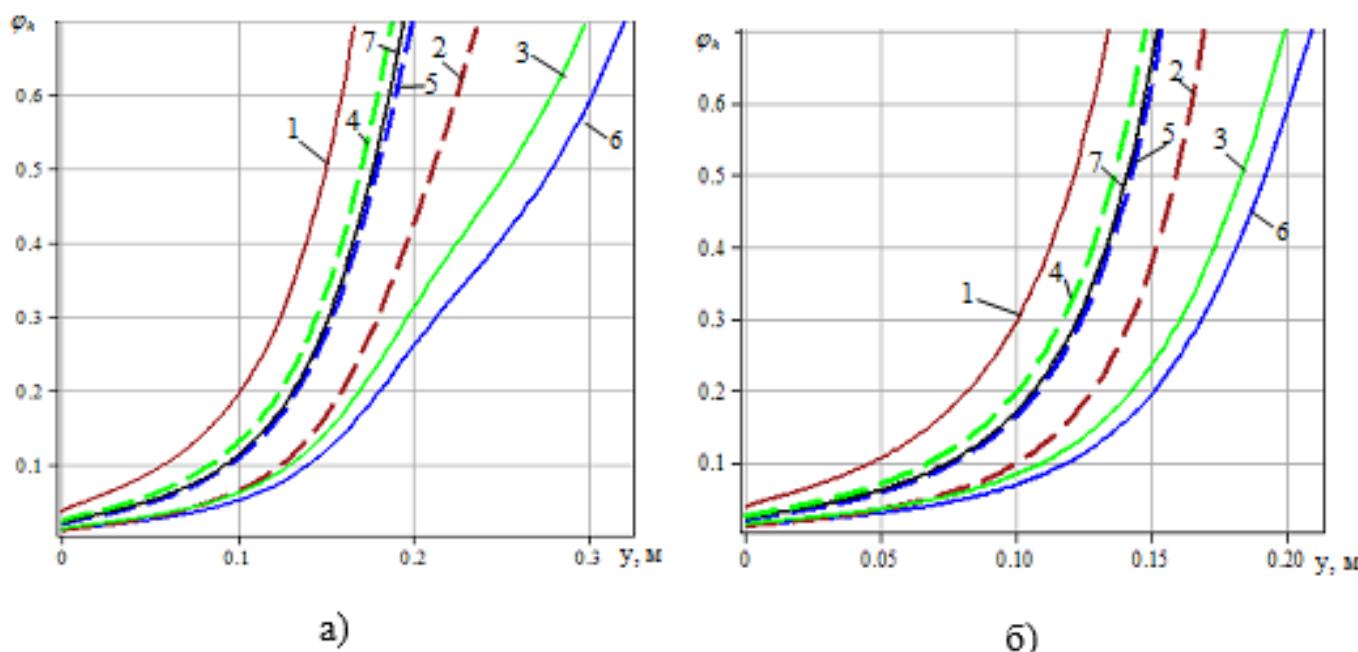


Рис. 2.22. Залежність об'ємного газовмісту  $\phi_h$  з висотою змішувача за:  
 а –  $\alpha_k=20^\circ$ ; б –  $\alpha_k=30^\circ$ : 1.  $D_0=0,3\text{ м}$ ,  $H=4\text{ м}$ ,  $n=60$ ,  $P_H=500\text{ кПа}$ ; 2.  $D_0=0,3\text{ м}$ ,  
 $H=4\text{ м}$ ,  $n=20$ ,  $P_H=500\text{ кПа}$ ; 3.  $D_0=0,4\text{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

Із отриманих графічних залежностей можна зробити висновок, що за кута нахилу твірної конічного корпусу  $\alpha_k = 20^\circ$  досягнення об'ємного газовмісту, що відповідає появі снарядного режиму руху, відбудуватиметься на віддалі 0,1...0,2 м від входного вікна. Для змішувача із  $\alpha_k = 30^\circ$  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  $P_i = 400 \text{ кПа}$  до  $P_i = 500 \text{ кПа}$ . Узагальнюючи можна відмітити, що для забезпечення формування у конічному корпусі забірного пристрою стійкого снарядного режиму руху повітряно-сапропелевої суміші, його висота повинна знаходитись у межах  $h_k = 0,18...0,32i$ . За таких значень  $h_k$ , кута  $\alpha_k = 20^\circ...30^\circ$  та  $D_0 = 0,3...0,4i$  діаметр вихідного отвору змішувача знаходитиметься у межах  $D_a = 0,09...0,14\text{ м}$ , відповідно до якого буде приєднуватись піднімальний трубопровід таких же розмірів  $d = 0,09...0,14\text{ м}$ .

## 2.7. КОНСТРУКТИВНІ РОЗРОБКИ ПНЕВМАТИЧНИХ МЕХАНІЗМІВ ДЛЯ ДОБУВАННЯ САПРОПЕЛЬЮ

Запропонована пневматична технологія добування органічних сапропелів, як матеріалу безпосередньо з якого виробляється продукція (добрива) вимагає створення надійних забірних пристройів та засобів, які б були пристосовані до всіх видів розробки озерних родовищ сапропелів та не зашкоджали природному навколошньому середовищі. Першочерговим етапом для створення таких засобів є проведення розвідувальних робіт на озерах, з покладами сапропелів, які будуть використовуватись безпосередньо. Розробка попередньо визначених родовищ не можлива без вивчення їх масштабів, характеру залягання, властивостей, цільового призначення тощо.

Створення альтернативних пневматичних забірних пристройів передбачає виконання різноманітних конструктивних схем забірних пристройів, які на думку дослідників-розвідувальників можна було б економічно-доцільно застосовувати.

На основі вище обґрунтованого пневматичного забірного пристрою запропоновано ряд конструкцій інших забірних пристройів, які можна використовувати на родовищах сапропелів виходячи з висновків встановлених розвідувальними роботами.

За даними конструктивними схемами можливо проектувати машини по добуванню сапропелів безпосередньо для добрив, для відновлення акваторій озер, для промислового використання з дотриманням вимог до добутої сировини, та екологічно безпечними наслідками при цьому підвищуючи продуктивність та ефективність роботи.

Запропоновані конструкції забірних пристройів з пневматичним розрихлювачем не завжди буде виконувати роботу по добуванню сапропелів на різних родовищах з великими показниками продуктивності. Оскільки здебільшого поклади органічних сапропелів знаходяться у завмерлих озерах, які в свою чергу мають невеликі водні залишки та значні рослинні забруднення.

З метою збільшення продуктивності забірних пристройів на забруднених рослинністю озерах в комплексі засобів для добування необхідно застосовувати ріжучі фрези, які б розрізали верхній рослинний шар сапропелю при зануренні, а також розрихлювали нижні злежані сапропелеві поклади з метою покращення їх подальшого пневматичного піднімання до надводної поверхні.

Тому пропонується пневматичний забірний пристрій з додатковим фрезерним робочим органом рис. 2.23.

Даний пристрій містить ріжучу фрезу з гострими лезами-лопатями, вмонтовану всередині корпусу, яка приводиться в обертовий рух шляхом потрапляння потоку стиснутого повітря, що виходить з сопел напірного повітрепроводу, на бічну поверхню лопатей. При обертанні фреза механічно розрізає рослинний покрив на частинки та розрихлює поклади сапропелю, захоплюючи їх за рахунок утворення повітряно-сапропелевого завихрення та

спрямовує вгору до транспортувального трубопроводу покращуючи його піднімання.

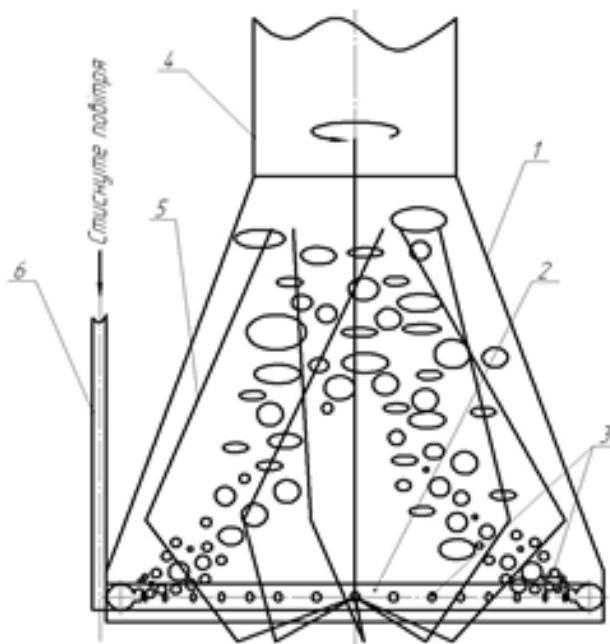


Рис. 2.23. Пневматичний збірний пристрій з фрезерним розрихлювачем:  
1 – корпус; 2, 3 – напірний трубопровід з соплами; 4 – піднімальний  
трубопровід; 5 – ріжуча фреза; 6 – магістраль подачі повітря.

Добування сапропелів з підводних родовищ забірним пристроєм рис 2.2 відбувається в більшості воронковим методом, з можливим застосуванням траншейного та папільонажного, при цьому даний пристрій оснащений пасивним розрихлюючим апаратом. Для ведення розробки як воронковим так і траншейним методами добування пропонується конструкція пристрою рис. 2.24. Завдяки удосконаленню змішувача отримали нову конструкцію пневматичного забірного пристрою з рухомою забірною частиною та активним нагнітально-розрихлюючим апаратом, який працює за принципом роботи аналогічним забірному пристрої рис 2.2. та відрізняється конструктивними особливостями.

Даний забірний пристрій для добування сапропелю містить корпус, який поступово переходить у піднімальний трубопровід і має можливість рухатись у вертикальній (при зануренні) та горизонтальній (при роботі) площинах, пневматичний активний розрихлювач, що являє собою два циліндра з отворами і щілинами виконані у вигляді гвинта з яких подається стиснуто повітря в корпус, турбіну – призначену для приводу, додатковий розрихлювач з соплами, захисну решітку та магістраль подачі повітря.

Конструкція даного пристрою дозволяє збільшувати робочу ширину захвату, а пневматичний активний розрихлювач забезпечує якісне розрихлення та нагнітання покладів у піднімальний трубопровід, оскільки потоки повітря, що виходять через гвинтові отвори утворюють так званий повітряний горизонтальний шnek, що збільшує зону контакту повітря і сапропелю чим підвищується продуктивність.

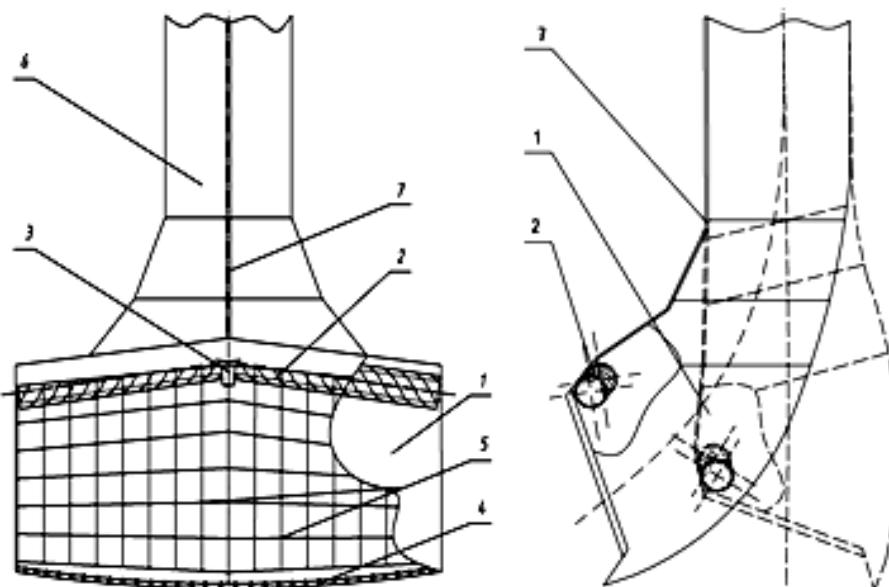


Рис. 2.24. Забірний пристрій з активним пневматичним розрихлювачем:

1 – корпус; 2 – пневматичний активний розрихлювач; 3 – турбіна; 4 – додатковий розрихлювач; 5 – захисна решітка 6 – піднімальний трубопровід; 7 – магістраль подачі повітря.

За аналогічним принципом роботи працює і забірний пристрій рис. 2.25, відрізняється лише пасивним пневматичним розрихлювачем та містить пневматичний транспортуючий нагнітальний пристрій (ежектор) за допомогою якого можливо добувати поклади з великих глибин.

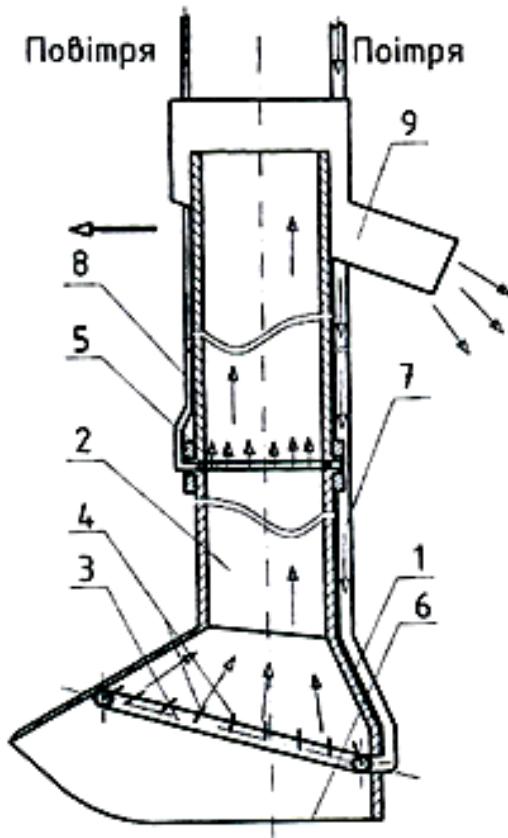


Рис. 2.25. Пневматичний забірний пристрій для глибинних робіт: 1 – корпус; 2 – піднімальний трубопровід; 3 – напірний трубопровід; 4 – сопла; 5 – транспортуючий нагнітач; 6 – захисна решітка; 7, 8 – магістралі подачі повітря; 9 – вивідний рукав.

Оскільки максимальна енергія стиснутого повітря затрачається на розріхлення та забір сапропелів, незначна її частина лишається на піднімання покладів. Для забезпечення розробки сапропелю з великих глибин пропонується встановлення транспортуючого нагнітального апарату в піднімальному трубопроводі, який в свою чергу буде доповнювати і підвищувати виштовхувальну енергію повітря.

Також для забезпечення папільонажного руху пристрою (поперемінне переміщення пристрою з ліва на право і навпаки) при добуванні сапропелю запропонована нова конструктивна схема змішувача рис. 2.26, яка дозволяє підвищити ефективність роботи збільшивши ширину захвату сапропелю за один прохід засобу.

На відміну від воронкового способу розробки родовищ використання запропонованого змішувача підвищує продуктивність, оскільки не враховує час на перевалочні операції по підніманню та перестановці пристрою.

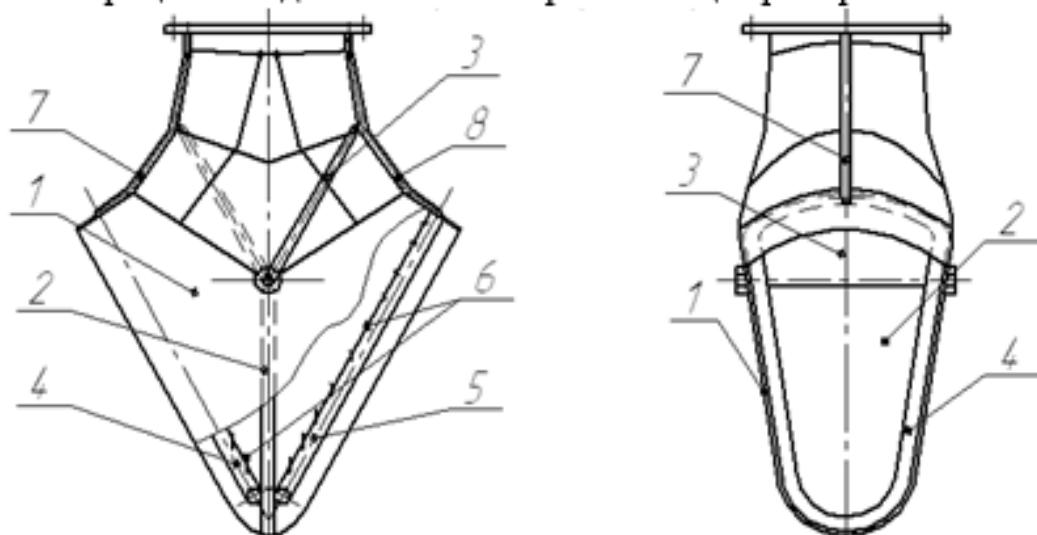


Рис. 2.26. Пневматичний змішувач забірного пристрою: 1 – корпус; 2 – перегородка; 3 – рухома заслінка; 4, 5 – відповідно лівий та правий кільцеві напірні повітропроводи; 6 – сопла; 7, 8 – магістралі подачі повітря.

Застосування даного змішувача забезпечує рівномірну розробку середніх шарів покладів сапропелю, а комплектування піднімальним трубопроводом з ежектором дозволить збільшити глибину розробки.

Запропоновані пристрої характеризуються одночасним виконанням кількох операцій зокрема розріхлення, забір і піднімання покладів сапропелів з підводних родовищ до надводної поверхні. Запропоновані конструкції можуть використовуватися на різних озерних родовищах, пристосовані до різних глибин добування та здатні добувати сапропелі природної вологості.

## 2.8. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

На підставі проведених теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Синтез пневматичних засобів для добування сапропелю дозволив отримати конструкцію забірного пристрою та сформувати склад засобу добування органічного сапропелю для добрив, обґрунтувати процес його роботи, визначити переваги та встановити вимоги для добування якісної сировини.

2. Аналіз робочого процесу забірного 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 забірного пристрою 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 газовмісту за висотою конічного корпуса (змішувача) забірного пристрою (2.47), дозволила встановити межі його конструктивно-технологічних параметрів за яких відбудуватиметься формування снарядної структури повітряно-сапропелевого потоку у піднімальному трубопроводі.

6. Запропоновані конструкції пневматичних забірних пристрій та змішувачів, які входять до складу засобів для добування сапропелю заслуговують позитивної оцінки, оскільки мають суттєві переваги над відомими механічними і гідромеханічними засобами, вдосконалюють один одного та доповнюють з врахуванням характеру родовища сапропелів та складності добувного процесу.

## 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 забірного 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 забірного пристрою проводились на озері Зяцьке Старовижівського району, Волинської області 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 забірного 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 забірного пристрою із обґрунтованими у результаті дослідження параметрами в складі засобу для добування сапропелю.

### 3.2. ПРИЛАДИ, ОБЛАДНАННЯ ТА АПАРАТУРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДОСЛДЖЕНЬ

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

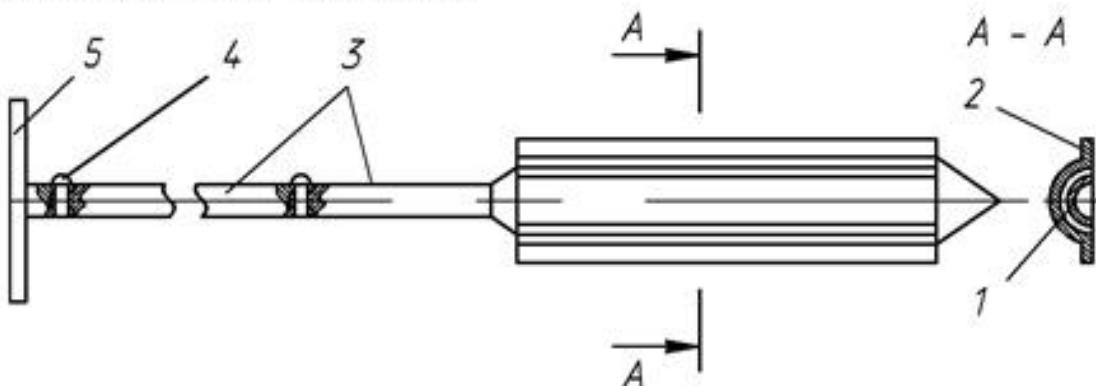


Рис. 3.1. Схема сапропелерозвідувального бура

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<sup>0</sup>C ± 2<sup>0</sup>C (рис. 3.3, а); електронні ваги ТВЛ-0,5 (рис. 3.3, в); термометр-щуп електронний TFA 301018 (рис. 3.3, д); ексикатор та алюмінієві бюкси (рис. 3.3, г).



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

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<sup>0</sup>C (рис. 3.3 б), та фарфорові бюкси (рис. 3.3, е).

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°C ± 2°C (рис. 3.3, а); електронні ваги ТВЛ-0,5 (рис. 3.3, в); термометр-щуп електронний TFA 301018 (рис. 3.3, д); ексикатор 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°C (рис. 3.3 б), та фарфорові бюкси (рис. 3.3, е).



Рис. 3.3. Прилади та обладнання для проведення дослідження: 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).

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 цилінду 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 використовували постійний магніт 10 закріплений на шківі, а на рамі 1 – давач 11. Давач у свою чергу з'єднаний провідником із вимірювальним пристріем, який фіксує числове значення максимальної частоти обертання внутрішнього циліндра.

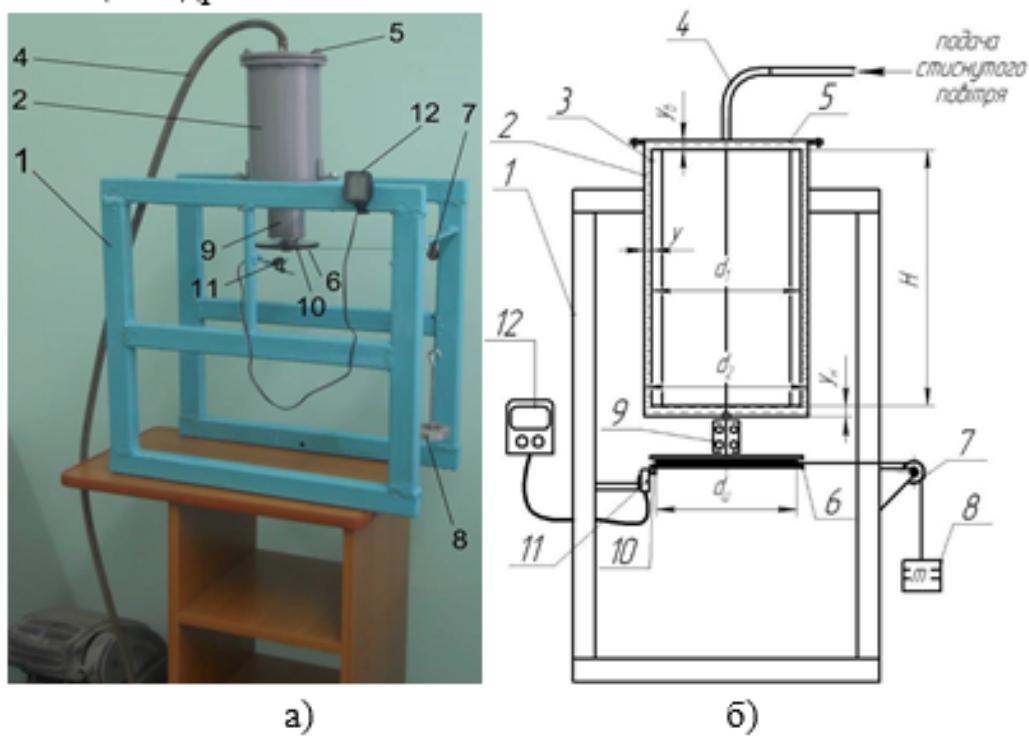


Рис. 3.4. Установка для дослідження в'язкості сапропелю: а – фото; б – схема;  
1 – рама; 2 – зовнішній циліндр; 3 – внутрішній циліндр; 4 – магістраль подачі стиснутого повітря; 5 – кришка зовнішнього циліндра; 6 – привідний шків;  
7 – блок; 8 – вантаж; 9 – блок підшипників; 10 – постійний магніт;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

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

Дана установка складається із пластикової ємності 1 на передній стінці якої нанесено координатну сітку 9. У внутрішній частині ємності 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 кріпилася стрілка 8, а на корпусі вентиля шкала 4 проградуйована 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.

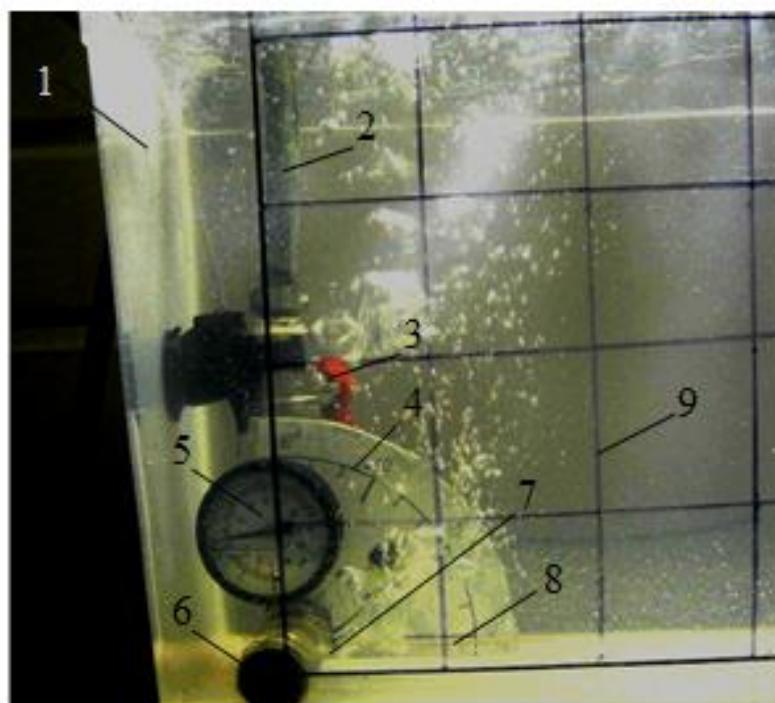


Рис. 3.5. Фото установки для дослідження руху повітряного потоку у рідинах різної в'язкості

Фіксація траєкторій 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 безпосередньо 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 забірного 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 підймального трубопроводу до мірної посудини 5 забезпечується гнуучкою турбою.

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

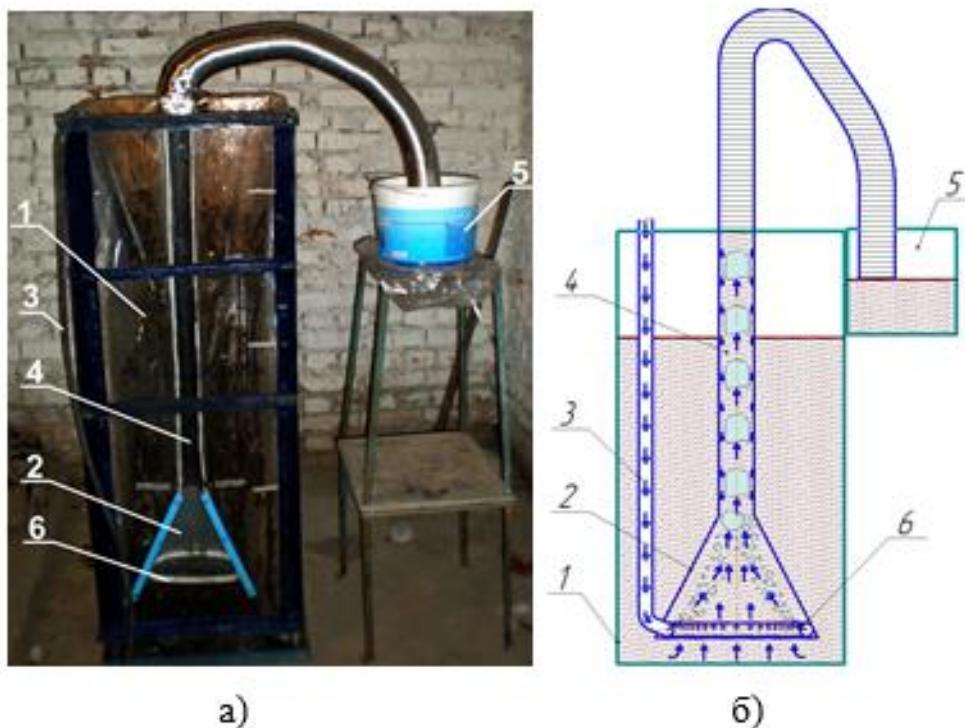


Рис. 3.6. Експериментальна установка: а – фото; б – схема; 1 – корпус, 2 – конус у розрізі, 3 – магістраль подачі стиснутого повітря, 4 – піднімальний трубопровід у розрізі, 5 – мірна посудина, 6 – напірний повітропровід з отворами

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. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.3.1 Методика відбору зразків сапропелю

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

Відбір проб сапропелевих покладів (рис. 3.6) 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 покладів (пелоген).

Визначення загальної глибини брання проб покладів сапропелю проводили з точністю до 0,1 м. При зондуванні визначали глибину води та загальну глибину покладів (від їх поверхні до мінерального дна). Зразки сапропелів відбирали від поверхні покладів через кожні 1м в глибину до мінерального дна. Відбирання проб сапропелів проводили з глибин 1...10м.

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

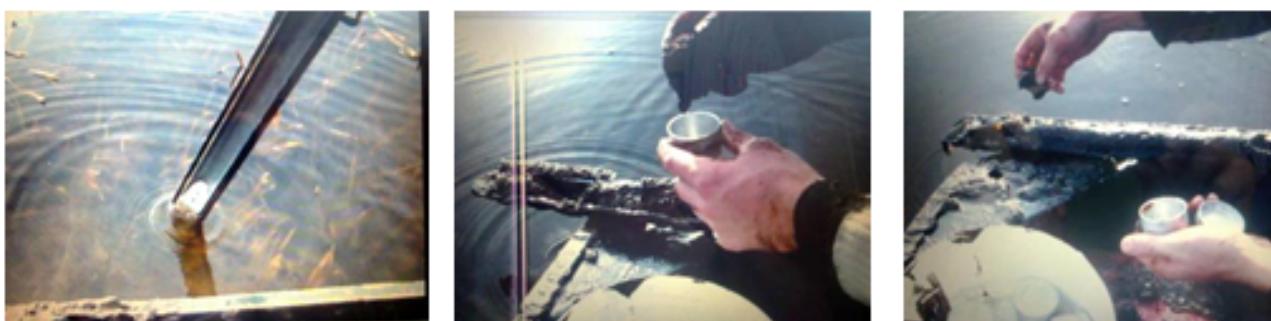


Рис. 3.7. Фото відбору зразків сапропелю з човна на озері Зяцьке

#### 3.3.2. Методика визначення природної вологості сапропелю

Визначення природної вологості сапропелю необхідне для попереднього встановлення кількісного запасу органічної сировини в перерахунку на добрива, а також проектування пристрій з врахуванням пристосованості до покладів, які будуть добувати. Тому визначення природної вологості для озера яке буде очищуватись є вкрай необхідне.

Вологість сапропелю визначали за наявності відібраних проб з озера Зяцьке за наступною послідовністю.

З підготовленої пошарової проби сапропелю, яка попередньо перемішувалась до однорідної суміші в мірній ємкості, із чотирьох точок відбирали наважки масою 5г і поміщали в попередньо пронумеровані та просушені дюралюмінієві блюкси. Сапропелеву масу важили з точністю до 0,01г. Після цього блюкси 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 блюкси з матеріалом виймали з шафи і охолоджували до кімнатної температури. Охолоджені блюкси 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 вологи ( $W$ ) у відсотках обчислювали за формулою:

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

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

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

$m$  – маса наважки, кг.

### 3.3.3. Методика визначення зольності покладів

Після визначення вмісту природної вологості згідно п. 3.4 зразок сапропелю з алюмінієвих блюксів поміщали у фарфорові попередньо їх просушивши та зваживши. При цьому дотримувалась послідовність наважок відповідно з глибиною залягання покладів. Далі фарфорові блюкси з сапропелем розміщали в холодній муфельній печі і поступово (протягом 1 години) нагрівали до температури  $800^{\circ}\text{C}$ , яку підтримували на протязі 1 години. Після прожарювання фарфорові блюкси із зольним залишком виймали із печі і охолоджували 5 хвилин на повітря, а потім в ексикаторі до кімнатної температури. Охолоджені фарфорові блюкси зважували.

Для контролю фарфорові блюкси з зольним залишком прожарювали протягом 30 хвилин при температурі  $800^{\circ}\text{C}$ . Охолоджені фарфорові блюкси 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.

### 3.3.4. 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 бюкса був заповнений більше ніж на 100%. Далі за допомогою леза зрізали надлишок досліджуваного матеріалу та вирівнювали його поверхню. Матеріал, що залишився 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. 3.8).



Рис 3.8. Визначення об'ємної маси сапропелю

### 3.3.5. 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 напруженів  $\tau$  на бічних поверхнях рухомого циліндра 3.

$$\tau = \eta \cdot \left( \frac{du}{dv} + \frac{du_a}{dv_a} + \frac{du_i}{dv_i} \right), \quad (3.4)$$

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

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

$dy$ ,  $dy_a$ ,  $dy_i$  – 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:

$$\tau = \eta \cdot \left( \frac{u}{y} + \frac{u_a}{y_a} + \frac{u_i}{y_i} \right). \quad (3.5)$$

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

$$M_{\dot{\epsilon}\delta} = \tau \cdot \pi \cdot d_1 \cdot H \cdot \left( \frac{d_1}{2} \right) + 2 \cdot \tau \cdot \left( \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \right) \cdot \left( \frac{2}{3} \right) \cdot \left( \frac{d_1}{2} \right), \quad (3.6)$$

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

Звідки

$$\tau = \frac{2 \cdot M_{\dot{\epsilon}\delta}}{\pi \cdot d_1^2 \cdot H \cdot \left( 1 + \frac{d_1}{3 \cdot H} \right)}. \quad (3.7)$$

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

$$u = \omega \cdot \frac{d_1}{2}, \quad (3.8)$$

$$u_a = u_i = \omega \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{d_1}{2} = \omega \cdot \frac{d_1}{3}, \quad (3.9)$$

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

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)-(3.9) отримаємо

$$\eta = \frac{2 \cdot M_{\dot{\epsilon}\delta}}{\pi \cdot d_1^2 \cdot H \cdot \left( 1 + \frac{d_1}{3 \cdot H} \right) \left( \frac{\omega \cdot d_1}{d_2 - d_1} + \frac{\omega \cdot d_1}{3} \cdot \left( \frac{1}{y_a} + \frac{1}{y_i} \right) \right)}. \quad (3.10)$$

Оскільки, з іншої сторони

$$M_{\dot{\epsilon}\delta} = m \cdot g \cdot d_g / 2, \quad (3.11)$$

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

$d_g$  – діаметр шківа приводу внутрішнього циліндра, м.

Врахувавши, що  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ , де  $n$  – частота обертання валу внутрішнього циліндра (об/с) та (3.11) із (3.10) отримаємо

$$\eta = \frac{m \cdot g \cdot d_s}{2 \cdot \pi^2 \cdot n \cdot d_1^3 \cdot H \left( 1 + \frac{d_1}{3 \cdot H} \right) \left( \frac{1}{d_2 - d_1} + \frac{1}{3 \cdot y_d} + \frac{1}{3 \cdot y_i} \right)}. \quad (3.12)$$

Для розрахунку коефіцієнта динамічної в'язкості за формулою (3.12) використовували дані проведени експериментально з використанням установки описаної 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 досліджуваним 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 починається 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 валу рухомого циліндра 3 та сумарної маси вантажу 8, що їй відповідала, за формулою (3.12) розраховували значення динамічної в'язкості сапропелю для конкретних умов експерименту.

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

Важливими конструктивними параметрами пропонованого пневматичного забірного 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 (коєфіцієнт динамічної в'язкості при  $20^{\circ}\text{C}$   $\eta = 0,001004 \text{ J} \cdot \text{d}^{-1}$ ), масло індустріальне SAE 40 (коєфіцієнт динамічної в'язкості при  $20^{\circ}\text{C}$   $\eta = 0,0275 \text{ J} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 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 визначенім планом експерименту за нульового значення кута його нахилу до горизонту, закріпляли у ковзній муфті. Тоді даний елемент разом із манометром та шлангом подачі стисненого повітря монтувався у ємності 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 площа передньої панелі камери була паралельна площині передньої стінки ємкості установки. Встановлювали режим роботи камери – зймання 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

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 ACDSee 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 закінченнюожної 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. 3.9).

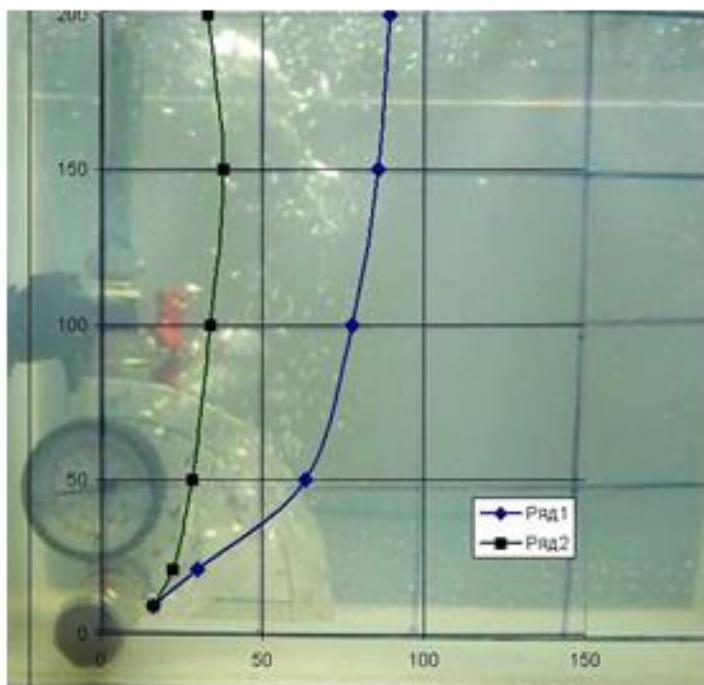


Рис. 3.9. Зразок опрацьованого фотографічного зображення руху повітряного потоку в рідині (воді)

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

### 3.3.7. Методика дослідження продуктивності забірного пристрою і структури потоку двохкомпонентного середовища у висхідній течії корпусу та піднімального трубопроводу

Аналіз літературних джерел та попередні дослідження дозволили встановити, що визначальний вплив на продуктивність роботи розглядуваного забірного 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 наступних факторів: довжина піднімального трубопроводу, товщина сапропелю у ємкості, тиск подачі повітря (рис. 3.10). 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 некомпозиційним планом Бокса-Бенкіна другого порядку [51].

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.

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

$$x_1 = \frac{P - P_0}{\varepsilon_1}, \quad x_2 = \frac{l - l_0}{\varepsilon_2}, \quad x_3 = \frac{h - h_0}{\varepsilon_3}, \quad (3.13)$$

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 фактору.



a)

б)

в)

Рис 3.10. 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

Для трифакторного досліду повне квадратне рівняння має вид:

$$\bar{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3. \quad (3.14)$$

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

$$b_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0_u}, \quad (3.15)$$

$$b_j = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^n x_{ji} y_i, \quad (3.16)$$

$$b_{jr} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n x_{ji} x_{ri} y_i, \quad (3.17)$$

$$b_{jj} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n x_{ji}^2 y_i - \frac{1}{16} \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n x_{ji}^2 y_i + \frac{1}{2n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0_u}, \quad (3.18)$$

де  $u$  – номер досліду в центрі плану;

$n_0$  – кількість дослідів в центрі плану;

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

$p$  – кількість факторів;

$i$  – номер досліду;

$n$  – 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 повторюваності, то однорідність ряду дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена [51]. Для цього визначали розрахункову величину даного критерію:

$$G^{\text{діф.}} = \frac{S_{y_i \max}^2}{\sum_{i=1}^n S_{y_i}^2}, \quad (3.19)$$

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

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

$$S_{y_i}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{g=1}^m (y_{ig} - \bar{y}_i)^2, \quad (3.20)$$

де  $m$  – число повторюваності в досліді;

$g$  – номер повторності;

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

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

Ряд дисперсій рахували однорідним, якщо:

$$G^{\text{діф.}} < G^{\text{табл.}}(0,05; n; f), \quad (3.21)$$

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

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

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{f_1}, \quad (3.22)$$

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:

$$S_{b_0}^2 = \frac{1}{n_0} S_y^2; \quad (3.23)$$

$$S_{b_j}^2 = 0,125 S_y^2; \quad (3.24)$$

$$S_{b_{jj}}^2 = 0,25 S_y^2; \quad (3.25)$$

$$S_{b_{jj}}^2 = 0,27083 S_y^2; \quad (3.26)$$

$$\text{cov}_{b_0 b_{jj}} = -0,16667 S_y^2; \quad (3.27)$$

$$\text{cov}_{b_{jj}b_{rr}} = 0,02083S_y^2. \quad (3.28)$$

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:

$$\Delta b_0 = t(0,05; f) S_{b_0}; \quad (3.29)$$

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

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

$$\Delta b_{jj} = t(0,05; f) S_{b_{jj}}. \quad (3.32)$$

Якщо коефіцієнт регресії виявлявсь 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:

$$F^{\text{адек.}} = \frac{S_{\text{ідд}}^2}{S_y^2}. \quad (3.33)$$

Дисперсія неадекватності  $S_{\text{ідд}}^2$  становить:

$$S_{\text{ідд}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}{f_2}, \quad (3.34)$$

де  $y_i, \bar{y}_i$  – значення функції відгуку  $i$ -го досліду, 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:

$$F^{\text{адек.}} \leq F^{\text{табл.}}(0,05; f_2 f_1), \quad (3.35)$$

де  $F^{\text{табл.}}(0,05; f_2 f_1)$  – 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.

### 3.3.8. Методика 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 забірного пристрою засобу для добування сапропелю на продуктивність останнього було проведено випробування у виробничих умовах із застосуванням математичного методу планування експерименту. Дані випробування проводили на озерах Зяцьке. Максимальна товщина водного дзеркала складала 0,7 м. Можлива загальна глибина добування сапропелів 16...18 м.

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

Для дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів засобу на його продуктивності у виробничих умовах виготовлена експериментальна установка з пневматичним забірним пристроєм (рис. 3.11) виконаним за схемою (рис. 2.2). Данна установка дозволяє змінювати зазначені конструктивно-технологічні параметри за схемою:

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

Для проведення досліджень були виготовлені три конусоподібних корпуси із різним за величиною діаметром входного отвору, який визначався залежно від кута нахилу твірної конуса, а висота кожного з корпусів становила 0,4 м. 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 зберігальний металевий каркас, який охоплює забірний корпус та кріпиться до піднімального трубопроводу



Рис. 3.11. Фото обладнання для проведення експерименту

Проведення повнофакторного експерименту здійснювали за симетричним некомпозиційним планом реалізації експерименту Бокса-Бенкіна другого порядку, та методикою наведеною у п. 3.3.7. За даними таблиці 3.2. факторів і рівнів їх варіювання проводили планування експерименту та встановили черговість проведення дослідів таблиця 3.3. Зв'язок між закодованими і натуральними величинами факторів встановлювався залежностями:

$$x_1 = \frac{P_i - P_0}{\varepsilon_1}; \quad x_2 = \frac{\alpha - \alpha_0}{\varepsilon_2}; \quad x_3 = \frac{d - d_0}{\varepsilon_3}; \quad x_4 = \frac{l - l_0}{\varepsilon_4}. \quad (3.37)$$

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;

$P_i, \alpha, d, l$ , – 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 (рис. 2.3.), який застосовувався в якості джерела електричної енергії та компресор 8. Ресивер компресора наповнювали атмосферним повітрям до тиску  $P_i=800$  кПа. Потім відкривали золотник компресора, через який надходило стиснуте повітря до робочого органу через пневмопровід під тиском встановленим планом експерименту.

Фактори і рівні варіювання

Таблиця 3.2

Рівні варіювання	Фактори			
	Тиск $P_k$ , 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

Планування експерименту і черговість проведення дослідів

Таблиця 3.3

Черговість проведення дослідів	Фактори			
	$P_k$ , 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

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 забірного 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 таблиця 3.4).

Експериментальні значення випробування засобу для добування сапропелю

Таблиця 3.4.

Кут нахилу твірної корпусу $\alpha_k$ , град.	Діаметр трубопроводу $d_m$	Довжина трубопроводу $l, \text{м}$	Глибина добування $h, \text{м}$	Тиск $P_h, \text{kPa}$	Продуктивність $Q, \text{kg} \backslash \text{хв}$	Тиск $P_h, \text{kPa}$	Продуктивність $Q, \text{kg} \backslash \text{хв}$	Тиск $P_h, \text{kPa}$	Продуктивність $Q, \text{kg} \backslash \text{хв}$	Тиск $P_h, \text{kPa}$	Продуктивність $Q, \text{kg} \backslash \text{хв}$
25	0,067	2...4	1,5	200	45,0	300	49,6	400	58,6	500	68,0
			3		38,6		44,4		59,6		65,8
			4,5		27,4		29,0		46,6		54,0
	0,055	2...4	1,5	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	2...4	1,5	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	2...4	1,5	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	2...4	1,5	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	2...4	1,5	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	2...4	1,5	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	2...4	1,5	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	2...4	1,5	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

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

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + \\ + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{44} x_4^2. \quad (3.38)$$

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

$$b_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}; \quad (3.39)$$

$$b_j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n x_{ji} y_i; \quad (3.40)$$

$$b_{jj} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^n x_{ji}^2 y_i - \frac{1}{48} \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n x_{ji}^2 y_i - \frac{1}{2n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}; \quad (3.41)$$

$$b_{jr} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n x_{ji} x_{ri} y_i; \quad (3.42)$$

де  $u$  – номер досліду в центрі плану;

$n_0$  – кількість дослідів в центрі плану;

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

$p$  – кількість факторів;

$i$  – номер досліду;

$n$  – 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 повторюваності, 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:

$$S_{b_0}^2 = \frac{1}{n_0} S_y^2; \quad (3.43)$$

$$S_{b_j}^2 = \frac{1}{12} S_y^2; \quad (3.44)$$

$$S_{b_{jj}}^2 = 0,25 \cdot S_y^2; \quad (3.45)$$

$$S_{b_{jr}}^2 = 0,1875 \cdot S_y^2; \quad (3.46)$$

$$cov_{b_0 b_{jj}} = -0,16667 \cdot S_y^2; \quad (3.47)$$

$$cov_{b_j b_{jr}} = 0,0625 \cdot S_y^2. \quad (3.48)$$

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:

$$\Delta b_0 = t \cdot S_{b_0}; \quad \Delta b_j = t \cdot S_{b_j}; \quad \Delta b_{jr} = t \cdot S_{b_{jr}}; \quad \Delta b_{jj} = t \cdot S_{b_{jj}}. \quad (3.49)$$

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.

У всіх випадках проведення експериментальних та виробничих досліджень пункту 3.3 повторність дослідів становила 3...6 разів. Обробку результатів проводили за схемою наведеною у джерелах [9, 22, 106].

### 3.3.9. Інженерна методика розрахунку пневматичного забірного пристрою засобу для добування сапропелю.

Робочий процес пневматичного забірного пристрою засобу для добування сапропелю починається з занурення, на попередньо встановлену глибину, де починається середній шар сапропелю та надходження стиснутого повітря до змішувача. Внаслідок виходу потоку стиснутого повітря через сопла у середовище сапропелю, що знаходитьться 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 забірного пристрою привів до створення його складових деталей у вигляді тіл обертання (рис. 3.12.). Ефективність такого пристрою залежить від його параметрів, до яких слід віднести об'єм  $V$ , відносне занурення  $\alpha_s$ , коефіцієнт заповнення  $\varepsilon$ . Об'єм залежить від сукупності об'ємів зрізаного конуса (zmішувач) та циліндра (піднімального трубопроводу) які визначають розміри самого засобу.

Повний об'єм  $V$  забірного пристрою для добування сапропелю становить:

$$V = \frac{\pi h_i}{3} (R^2 + r^2 + Rr) + \pi r^2 h_m, \text{m}^3 \quad (3.50)$$

де:  $R$  – радіус вхідного отвору змішувача, м;

$r$  – радіус піднімального трубопроводу, він же радіус вихідного отвору змішувача, м;

$h_i$  – геометрична висота конічного змішувача, м;

$h_m$  – геометрична довжина піднімального трубопроводу, м;

$\pi = 3,14$  математична константа.

Відповідно кут нахилу конуса становитиме  $\operatorname{tg} \alpha_k = h_m/R$ .

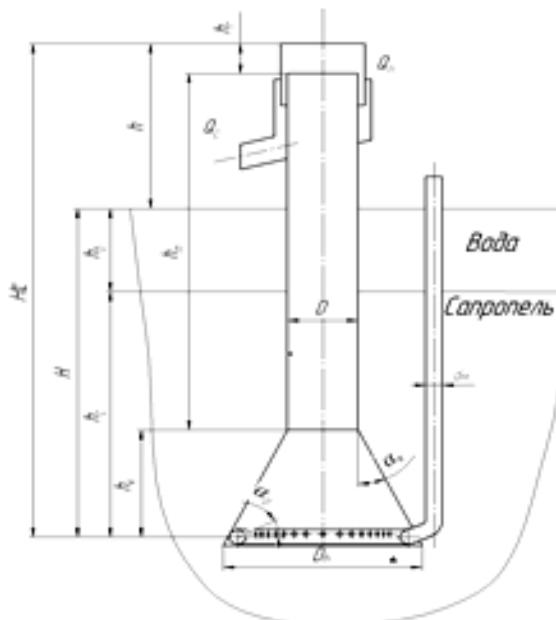


Рис. 3.12. Розрахункова схема забірного пристрою для добування сапропелю

Залежність, яка пов'язує сумарну геометричну довжину пневматичного добувного засобу із характеристиками родовища сапропелю має вигляд:

$$h + I = h_s + h_o + h_r = h + h_a + h_n = H_{\Sigma}, \quad (3.51)$$

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

$I$  – глибина добування сапропелю, м;

$h_s, h_m$  – 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 забірного пристрою (змішувача), яке стосовно розглядуваного засобу становить:

$$\alpha_c = \frac{I}{I + h} = \frac{h_a + h_n}{h_s + h_o + h_r}, \quad (3.52)$$

Об'ємна продуктивність пневматичного забірного 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:

$$\varepsilon = V_c / V \quad (3.53)$$

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  $0,1 \rho_0 g h$ . 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:

$$d_{i,n} = \sqrt{\frac{8\lambda_d \cdot l_{i,n} \cdot Q_n^2}{\pi^2 \cdot g \cdot (0.01 \cdot \rho \cdot h_g \cdot \rho_{cp,n} \cdot H_n)}}, \text{ мм} \quad (3.54)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гіdraulічного тертя;

$l_{i,n}$  – загальна довжина повітропроводу, м;

$H_n$  – довжина вертикальної частини повітропроводу, м;

$\rho$  – середня густина повітря при сталій температурі, кг/м<sup>3</sup>;

В такому випадку швидкість виходу повітря з сопла певного діаметру рівна:

$$v_i = d_i \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_1}, \text{ м/с,} \quad (3.55)$$

де  $d_i$  – діаметр сопла, м;

$R$  – 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:

$$Q_i = n \gamma f \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{\sigma^2}{RT_1}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.56)$$

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:

$$S_e = \pi \cdot r^2, \text{ м}^2 \quad (3.57)$$

Кількість рідини (сапропелю), що піднімається снарядом у дм<sup>3</sup>/с визначають експериментально або відомою емпіричною залежністю:

$$Q_c = 0,0785 \cdot v \cdot 2 \cdot r^2 / \varepsilon, \quad (3.58)$$

Тоді швидкість руху снаряду, співпадатиме з швидкістю руху сапропелю, що міститься над ним і становитиме:

$$v = \frac{Q_n \cdot S_e}{\varepsilon} \text{ м/с} \quad (3.59)$$

Відповідно загальну продуктивність пристрою розраховують:

$$Q = Q_i + 100Q_{\pi}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.60)$$

Отже швидкість пневмосуміші у піднімальному трубопроводі становитиме:

$$v_{i-\bar{n}} = Q / (3600\pi D^2/4), \text{ м/с} \quad (3.61)$$

Еквівалентний діаметр підйомного трубопроводу  $D$  залежить від коефіцієнта подачі, що пов'язаний з відносним зануренням засобу і визначається експериментально  $C=f(a)$ , тому при розрахунку діаметра піднімального трубопроводу враховують коефіцієнт запасу і вибирають менший діаметр трубопроводу.

$$D = (Q/C)^{2,5}, \text{ мм} \quad (3.62)$$

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:

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0} \cdot \frac{1}{\Delta p}, \quad (3.63)$$

де  $V_p$  – початковий об'єм поршня,  $\text{м}^3$ ;

$\Delta V$  – зміна об'єму,  $\text{м}^3$ ;

$\Delta p$  – зміна тиску, Па.

Величина втрат тиску на ділянці  $h_m$  визначається за формулою

$$\Delta p = \rho \cdot \lambda \cdot \frac{h_m}{D} \cdot \frac{v}{2}, \text{ Па} \quad (3.64)$$

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

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя по довжині;

$h_m, D$  – відповідно 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  $\Delta E=0,06$  мм.

$$Re = \frac{\nu d}{\mu} \quad (3.65)$$

де  $\mu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості,  $\text{m}^2/\text{s}$

Для труб промислового виготовлення з природною шорсткістю для будь-якої області опору можна скористатися формулою Альтшуля для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta E}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (3.66)$$

Для визначення висоти забірного пристрою (змішувача) можна скористатися емпіричною залежністю

$$h_k = 2,5(D_{\text{вх}} - D), \text{ м.} \quad (3.67)$$

Даний розрахунок доцільно застосовувати при проектуванні засобу для добування сапропелю для забезпечення якості виконання роботи, та отримання сапропелевої сировини потрібного гатунку.

### 3.4. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Розроблено програму і методики експериментальних лабораторно-виробничих досліджень; приведено опис та загальні види обладнання, пристрій та методики проведення досліджень; розроблено методику проведення повнофакторного експерименту із встановлення продуктивності лабораторної установки забірного пристрою 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 та методики.

## 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 вологомкість.

Природна вологість являється головним фактором при виборі родовища для добування органічного сапропелю, адже попередньо діагностуючи озеро ми можемо дати відповідь на питання, що стосується подальших енергетичних затрат на зневоднення та переробки покладів і доведення їх до стану добрив. Також вологість сапропелів визначають для правильного вибору та обґрунтування конструктивно-технологічних та режимних параметрів пристрій і засобів, які проектуються.

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 волгостей 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 оз. Зяцьке за глибиною залягання

Глибина залягання, <i>h</i> м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Середнє значення вологості, <i>W</i> %	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.

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

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

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.

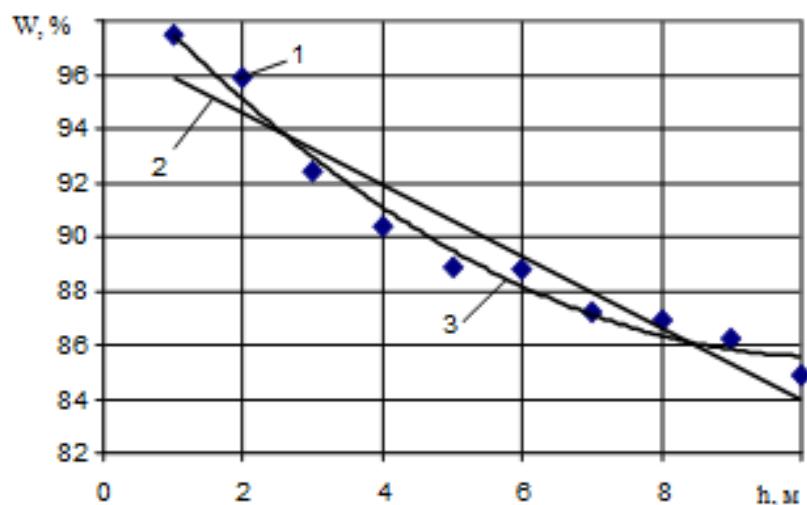


Рис. 4.1. Залежність вологості органічного сапропелю  $W$  о. Зяцьке від глибини залягання  $h$ : 1 – експериментальні точки; 2 – лінійна апроксимація; 3 – апроксимація поліномом другого порядку

## 4.2. РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗОЛЬНОСТІ САПРОПЕЛЬЮ

Для якісної оцінки покладів сапропелів озера 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 відібрани із шару покладів за допомогою сапропелерозвідувального бура (рис. 3.1, 3.2), сформовані відповідно до методики описаної у п. 3.3 та висушенні 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 (рис. 4.3.).

Таблиця 4.2.

Середні значення зольності сапропелю о. Зяцьке за глибиною залягання

Глибина залягання, <i>h</i> м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Середнє значення зольності, <i>A</i> , %	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

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

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

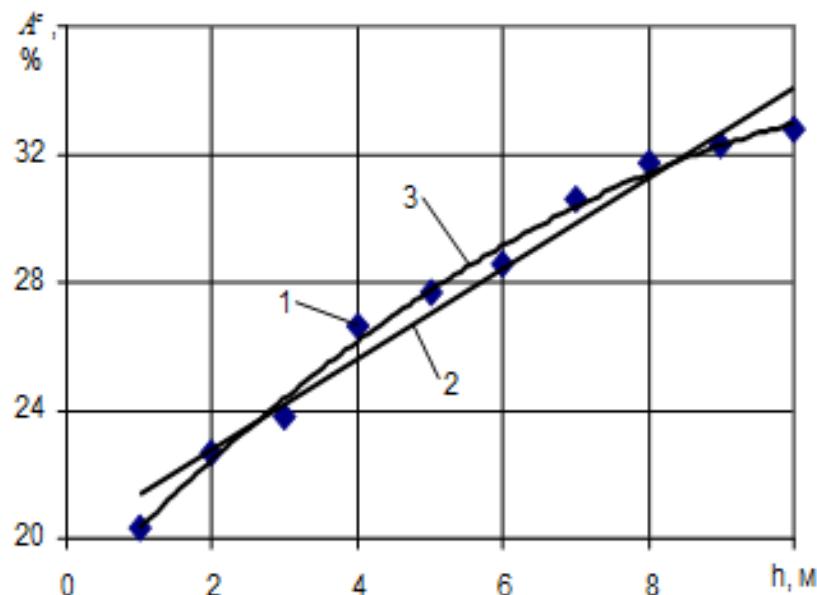


Рис. 4.3. Залежність зольності органічного сапропелю  $A^c$  о. Зяцьке від глибини залягання  $h$ : 1 – експериментальні точки; 2 – лінійна апроксимація; 3 – апроксимація поліномом другого порядку

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

$$A^c = -0,0898 \cdot h^2 + 2,3915 \cdot h + 18,0150. \quad (4.4)$$

Отриманий діапазон зміни зольності покладів  $A^c = 20\dots33\%$  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 відмиряння 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 САПРОПЕЛЬЮ

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 чотирохкратною 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:

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

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

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

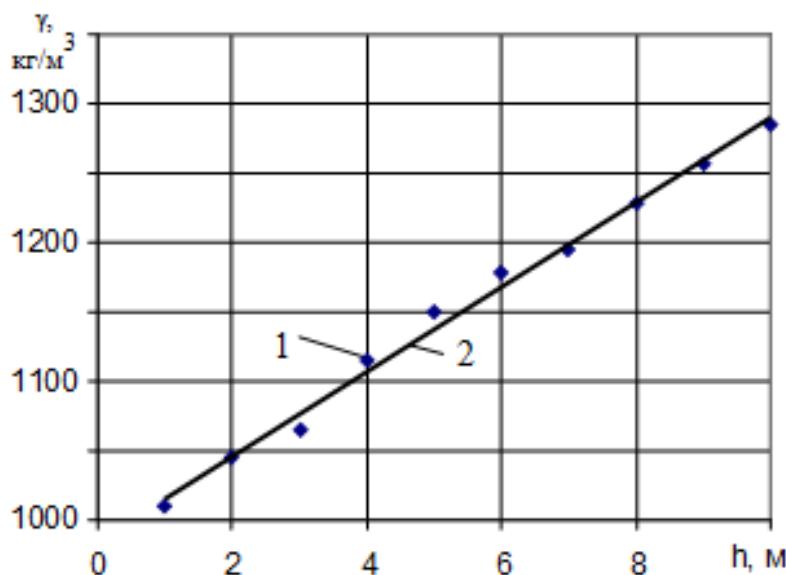


Рис. 4.4. Залежність об'ємної маси  $\gamma$  сапропелю о. Зяцьке від глибини залягання  $h$ : 1 – експериментальні точки; 2 – лінійна апроксимація

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

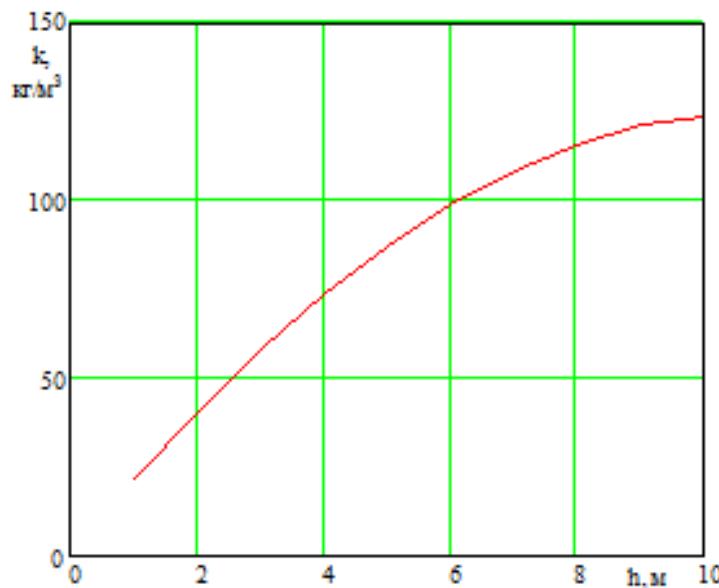


Рис. 4.5. Залежності вмісту абсолютно сухої органічної речовини  $k$  із глибиною залягання покладів  $h$

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.

За даними показниками можна стверджувати, що вміст органічної речовини в сапропелях озера Зяцьке, які будуть добуватися з глибини понад 4м

#### 4.4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ В'ЯЗКОСТІ ОРГАНІЧНОГО САПРОПЕЛЬЮ

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 відібрани 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 швидостей зсуву шарів та гідростатичних тисків наведені у табл. 4.4-4.6. Для аналізу впливу на коефіцієнт динамічної в'язкості швидкості зсуву шарів побудовані відповіді 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									
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								
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								
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

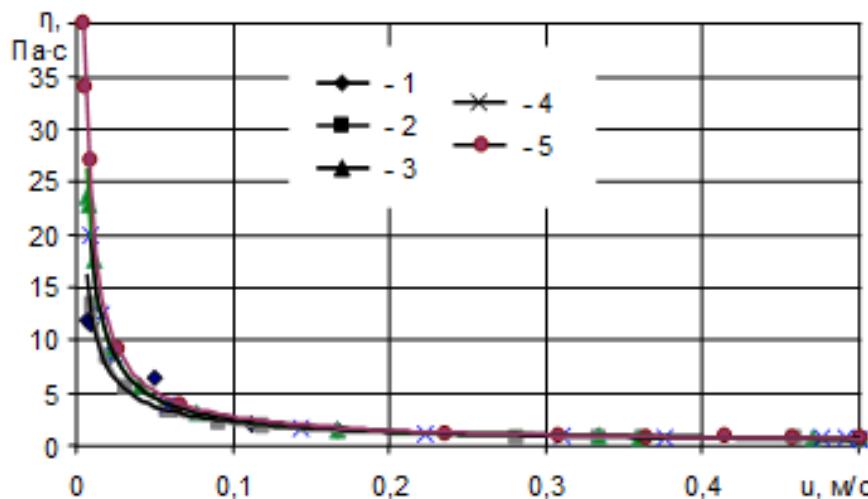


Рис. 4.6. Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  сапропелю вологості  $W_1 = 95 \pm 1\%$  від швидкості шарів  $u$  за гідростатичного тиску: 1 –  $P = 0$  кПа; 2 –  $P = 50$  кПа; 3 –  $P = 100$  кПа; 4 –  $P = 150$  кПа; 5 –  $P = 200$  кПа

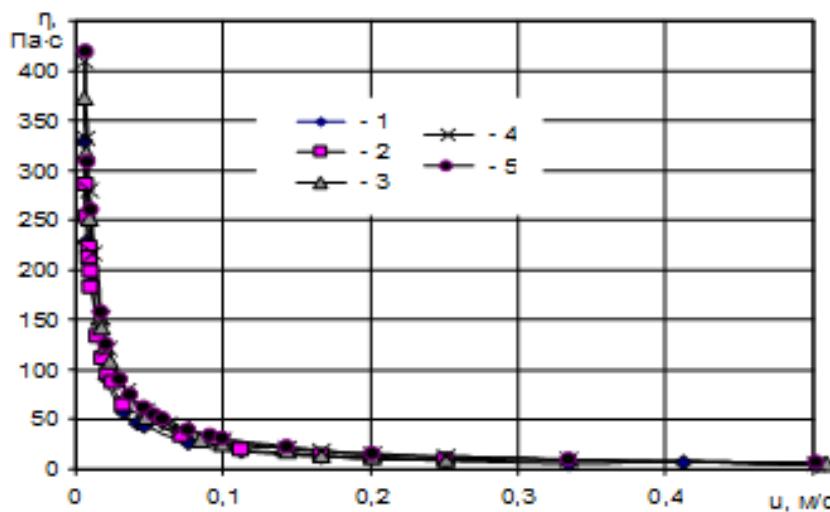


Рис. 4.7. Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  сапропелю вологості  $W_3 = 85 \pm 1\%$  від швидкості шарів  $u$  за гідростатичного тиску: 1 –  $P = 0$  кПа; 2 –  $P = 50$  кПа; 3 –  $P = 100$  кПа; 4 –  $P = 150$  кПа; 5 –  $P = 200$  кПа

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 негомогенною 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  $W_3 = 85 \pm 1\%$ .

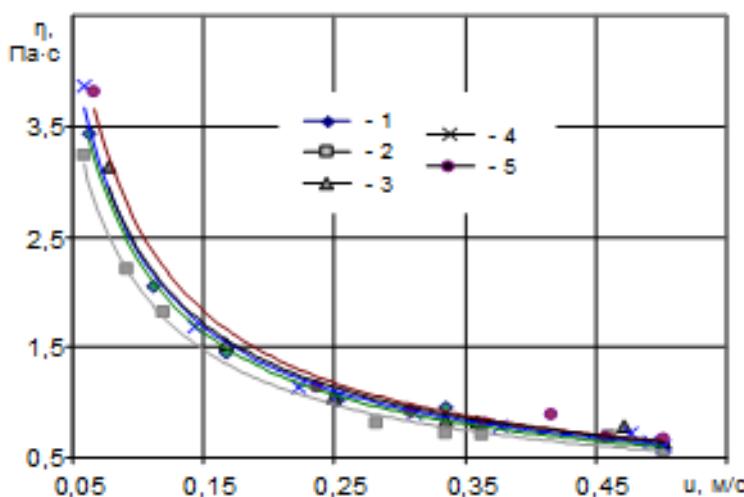


Рис. 4.8. Результати апроксимації коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  сапропелю вологості  $W_1 = 95 \pm 1\%$  степеневою функцією за гідростатичного тиску: 1 –  $P = 0$  кПа; 2 –  $P = 50$  кПа; 3 –  $P = 100$  кПа; 4 –  $P = 150$  кПа; 5 –  $P = 200$  кПа

Поведена апроксимація експериментальних значень коефіцієнта в'язкості у діапазоні швидкості  $u > 0,05$  м/с без урахування впливу гідростатичного тиску степеневою 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).

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).

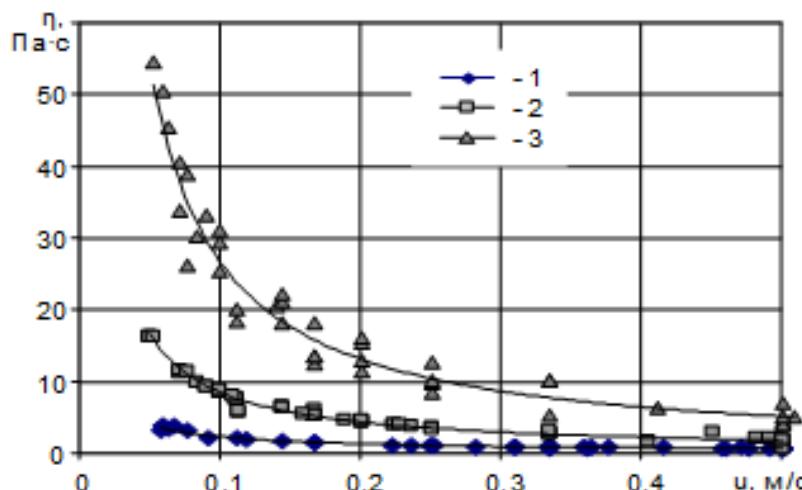


Рис. 4.9. Результати апроксимації коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  сапропелю степеневою функцією за його вологості: 1 –  $W_1 = 95 \pm 1\%$ ; 2 –  $W_2 = 90 \pm 1\%$ ; 3 –  $W_3 = 85 \pm 1\%$

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

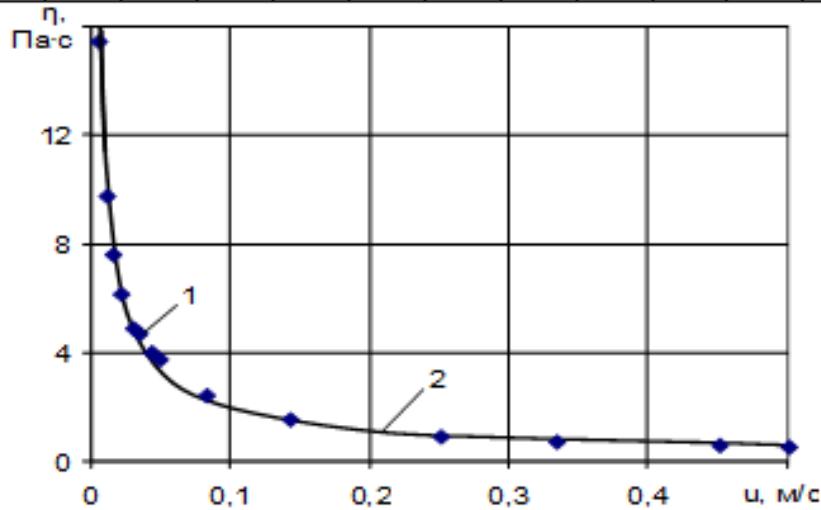


Рис. 4.10. Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості  $\eta$  миючого засобу від швидкості шарів  $u$ : 1 – експериментальні дані; 2 – апроксимація експериментальних даних степеневою функцією

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  $W_1 = 95 \pm 1\%$ .

#### 4.5. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ У РІДИНАХ РІЗНОЇ В'ЯЗКОСТІ

Для перевірки адекватності математичної моделі руху повітряної бульбашки, як елементу 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 підтверджив значний вплив на форму меж повітряного потоку в'язкості рідини. Так у випадку подачі повітря під тиском 400 кПа із отвору діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на  $45^\circ$  у воді із в'язкістю  $\eta = 0,001004 \text{ I } \text{d}\cdot\text{s}$  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  $\eta = 0,02751 \text{ I } \text{d}\cdot\text{s}$  даний показник становить  $x = 110 - 120$  мм (рис. 4.18). Під час подачі повітря під тиском 500 кПа із отвору діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на  $45^\circ$  у концентрований миючий засіб, в'язкість якого залежить від швидкості зміщення шарів і для умов експерименту знаходиться у межах  $\eta = 0,5 - 1,5 \text{ I } \text{d}\cdot\text{s}$ , 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  $0^\circ$  на  $45^\circ$  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).

У той же час за подачі повітря через горизонтальний отвір, діаметром 1,0-1,5 мм у концентрований миючий засіб, спостерігається завихрення повітряного потоку (рис. 4.21, 4.24). Інтенсифікація даного явища спостерігається для отвору діаметром 1,0 мм у діапазоні тисків подачі повітря 300-500 кПа (рис. 4.21 криві 6, 8, 10), а для отвору діаметром 1,5 мм – 200-300 кПа (рис. 4.24 криві 4 та 6). Для отвору діаметром 1,5 мм за тиску подачі повітря 500 кПа (рис. 4.24 крива 8), а також для отвору діаметром 0,5 мм у діапазоні тисків 100-500 кПа (рис. 4.20) дане явище відсутнє.

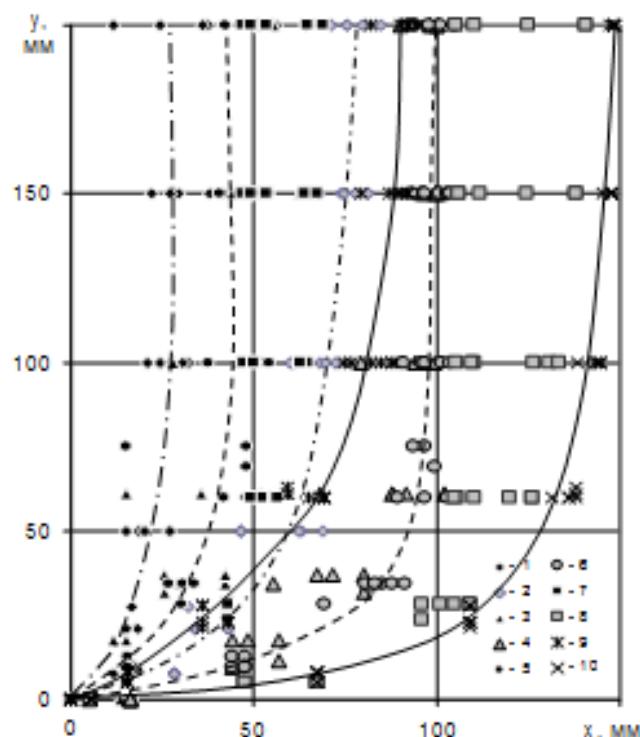


Рис. 4.11. Форми меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із отвору діаметром 0,5 мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300 кПа; 7-8 – 400 кПа; 9-10 – 500 кПа

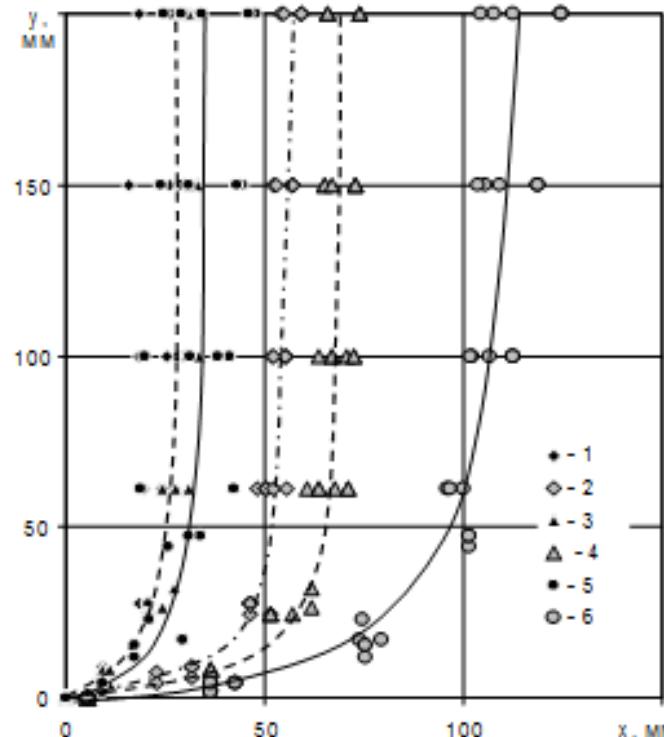


Рис. 4.12. Форми меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із горизонтального отвору діаметром 0,5 мм за тиску подачі: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 500 кПа

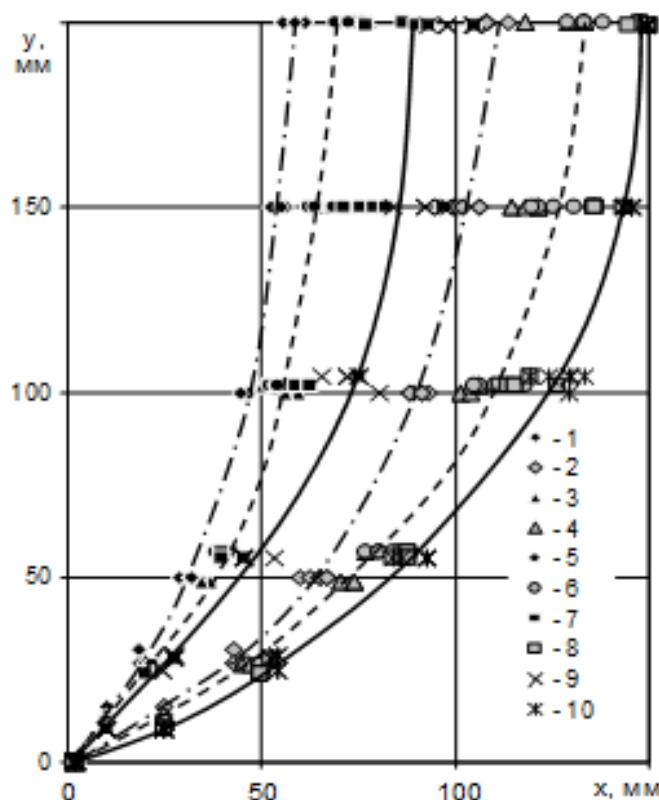


Рис. 4.13. Форми меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із отвору діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300 кПа; 7-8 – 400 кПа; 9-10 – 500 кПа

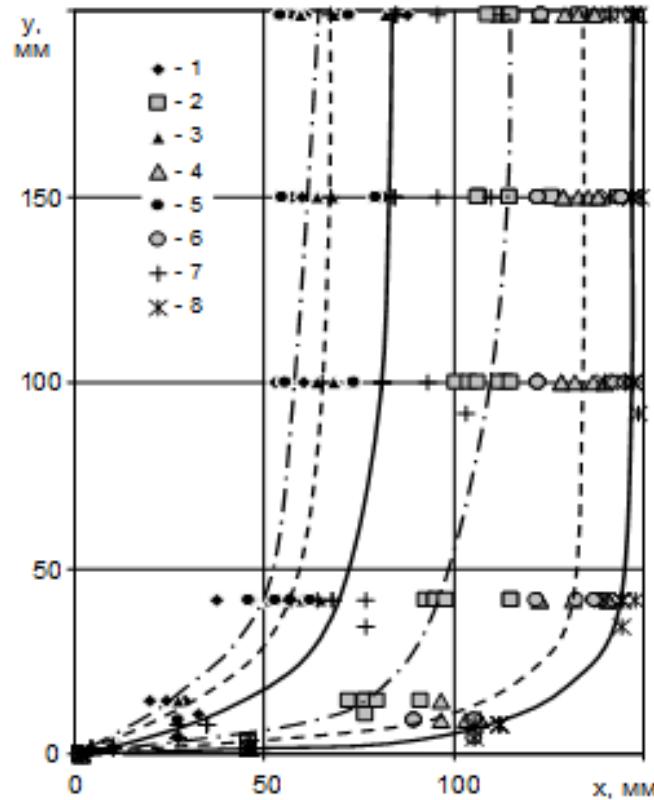


Рис. 4.14. Форми меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із горизонтального отвору діаметром 1,0 мм за тиску подачі: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300 кПа; 7-8 – 500 кПа

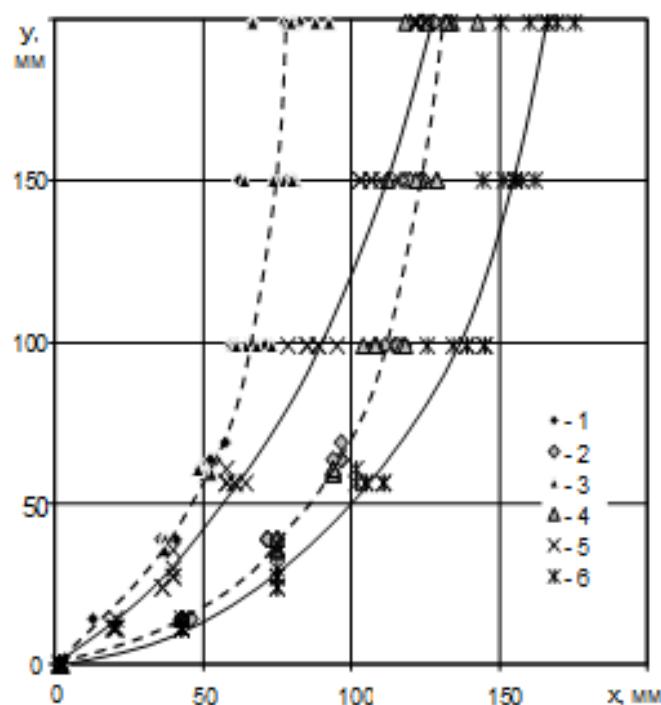


Рис. 4.15. Форми меж повітряного потоку під час його руху у воді після виходу із отвору діаметром 1,5мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 500 кПа

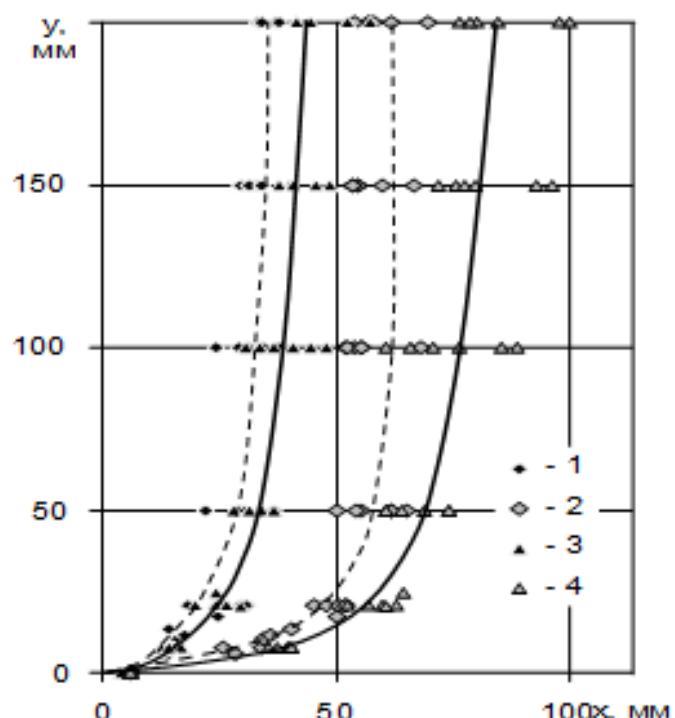


Рис. 4.16. Форми меж повітряного потоку під час його руху у маслі індустріальному після виходу із отвору діаметром 0,5мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 300 кПа

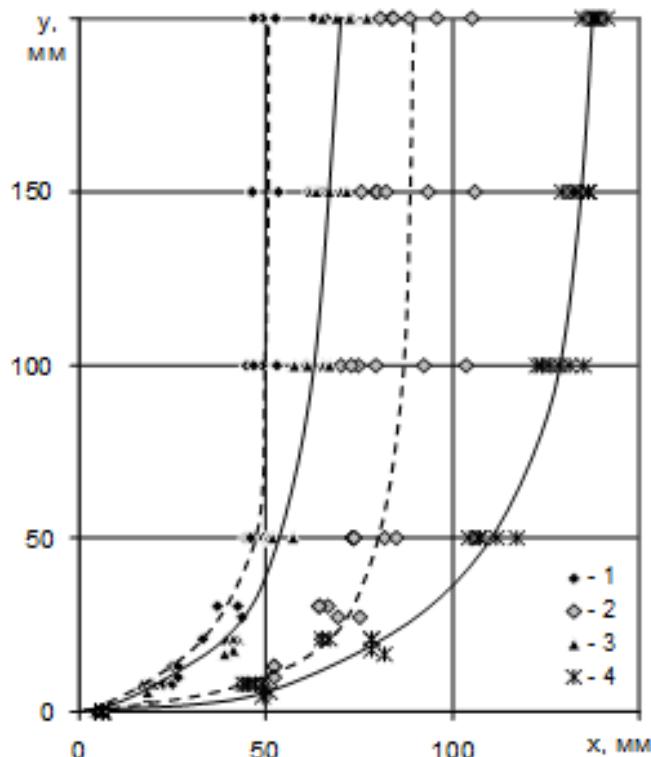


Рис. 4.17. Форми меж повітряного потоку під час його руху у маслі індустріальному після виходу із горизонтального отвору діаметром 0,5 мм за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 400 кПа

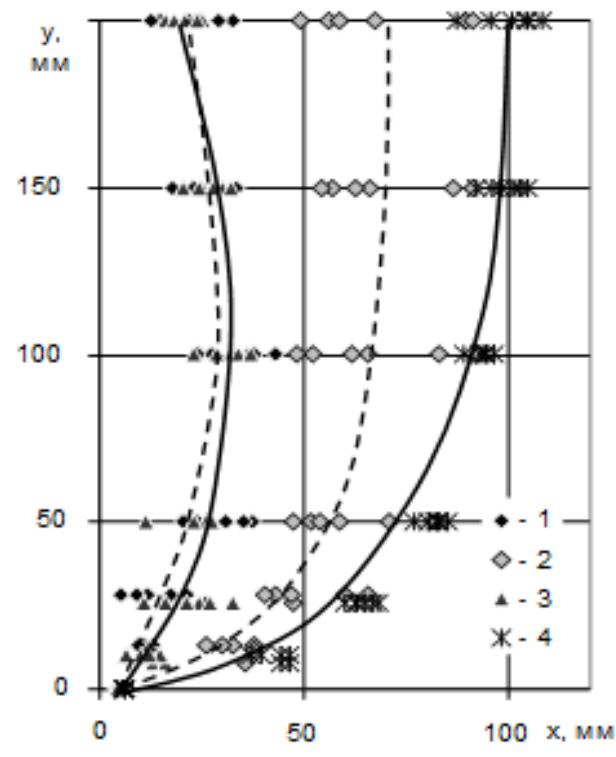


Рис. 4.18. Форми меж повітряного потоку під час його руху у маслі індустріальному після виходу із отвору діаметром 1,0 мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 400 кПа

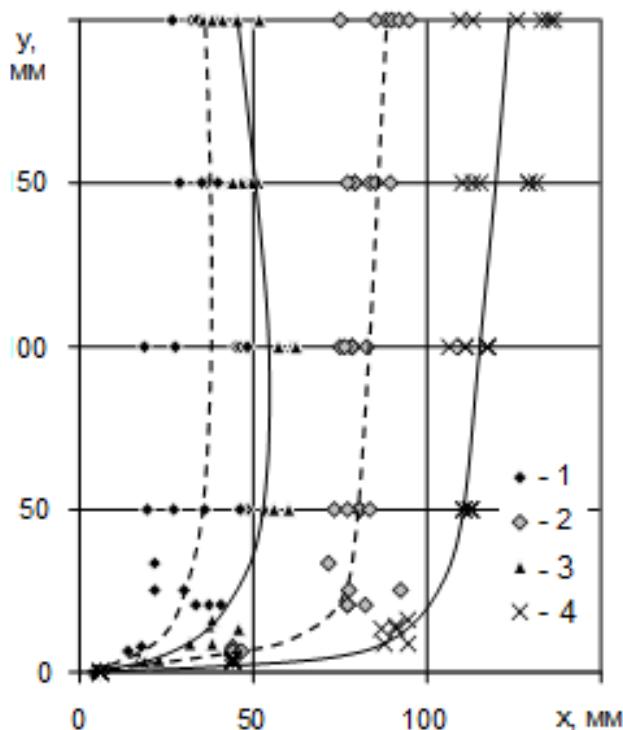


Рис. 4.19. Форми меж повітряного потоку під час його руху у маслі індустриальному після виходу із горизонтального отвору діаметром 1,5 мм за тиску подачі: 1-2 – 200 кПа; 3-4 – 400 кПа

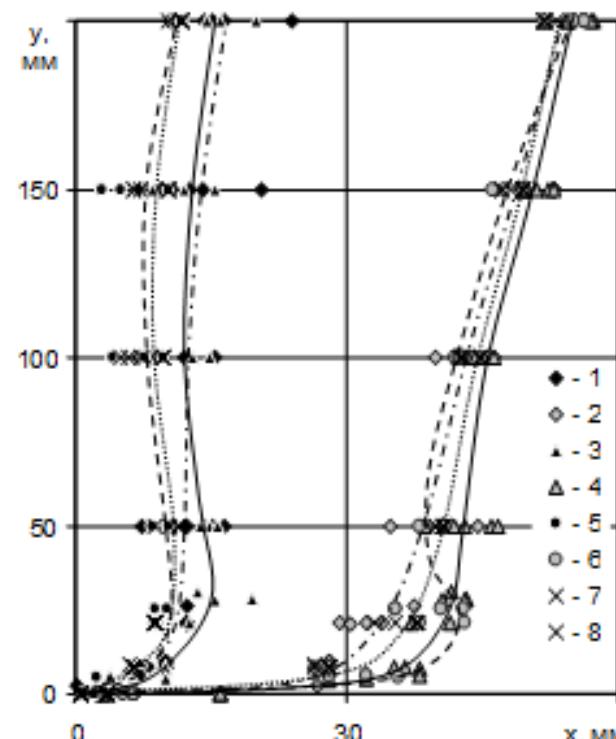


Рис. 4.20. Форми меж повітряного потоку під час його руху у миючому засобі після виходу із горизонтального отвору діаметром 0,5 мм за тиску подачі: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300 кПа; 7-8 – 400 кПа

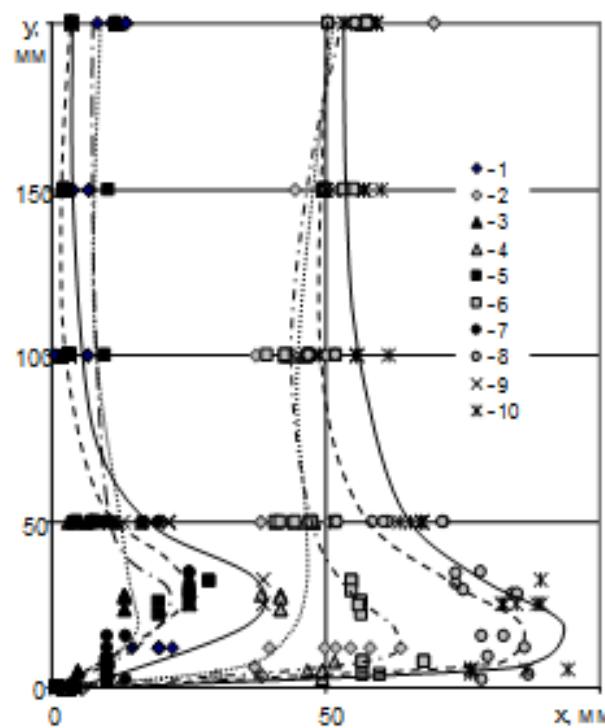


Рис. 4.21. Форми меж повітряного потоку під час його руху у муючому засобі після виходу із горизонтального отвору діаметром 1,0мм за тиску подачі: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300 кПа; 7-8 – 400 кПа; 9-10 – 500 кПа

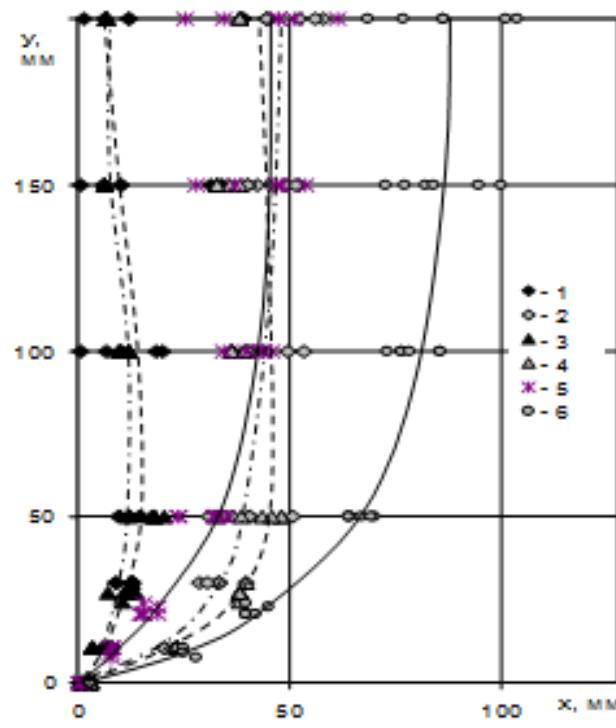


Рис. 4.22. Форми меж повітряного потоку під час його руху у муючому засобі після виходу із отвору діаметром 1,0мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі: 1-2 – 100 кПа; 3-4 – 300 кПа; 5-6 – 500 кПа

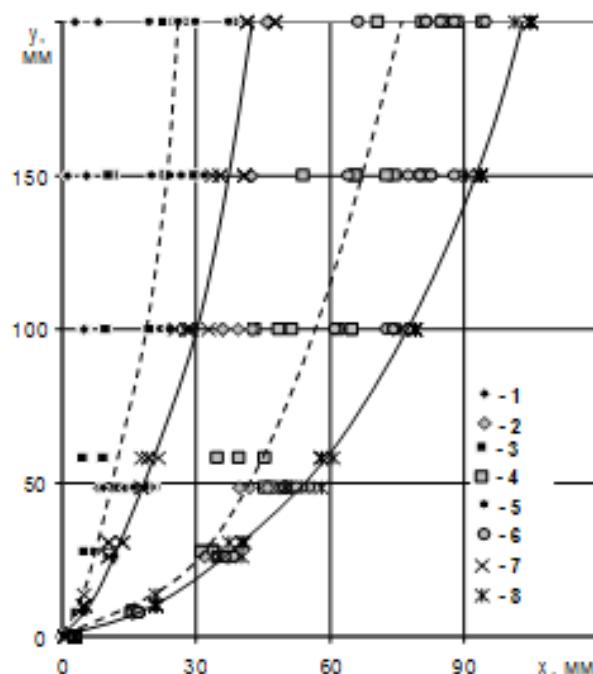


Рис. 4.23. Форми меж повітряного потоку під час його руху у миючому засобі після виходу із отвору діаметром 1,5мм відхиленого від горизонту на  $45^{\circ}$  за тиску подачі:  
1-2 – 100 кПа; 3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300 кПа;  
7-8 – 500 кПа

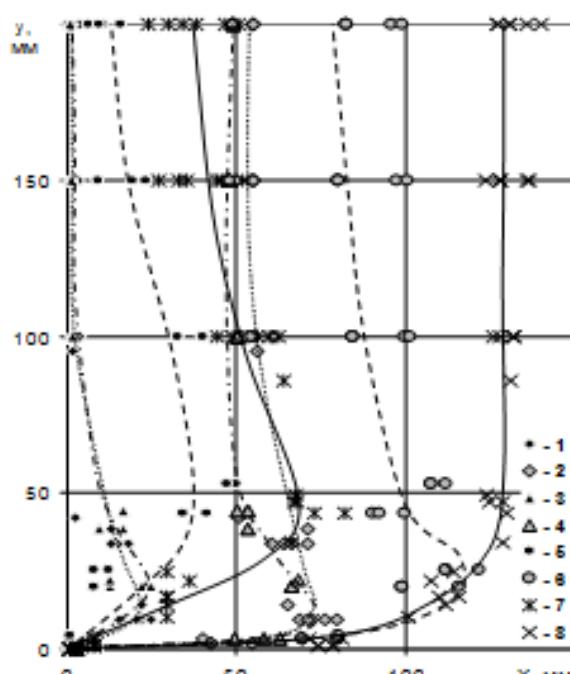


Рис. 4.24. Форми меж повітряного потоку під час його руху у муючому засобі після виходу із горизонтального отвору діаметром 1,5мм за тиску подачі: 1-2 – 100 кПа;  
3-4 – 200 кПа; 5-6 – 300 кПа; 7-8 – 500 кПа

Для випадку експерименту із концентрованим миючим засобом та кутом нахилу осі вихідного отвору  $45^{\circ}$  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 отвору та тиску подачі повітря, а отже і величини об'ємної подачі повітря веде до зростання площини поперечного перерізу потоку (рис. 4.11, 4.12, 4.19). Зменшення швидкості повітряного потоку із висотою підйому спричинює зростання площини його поперечного перерізу. Стабілізація даного показника спостерігається у межах висот підйому  $y = 50 \dots 100$  мм.

Порівняння експериментальних значень та форм 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 розпушенння покладів пониженої вологості можна використовувати завихрений повітряний потік. Завихрення досягається за горизонтального розташування осі вихідного отвору 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 отвори 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 ЗАБІРНОГО ПРИСТРОЮ І СТРУКТУРИ ПОТОКУ ДВОХКОМПОНЕНТНОГО СЕРЕДОВИЩА У ВИСХІДНІЙ ТЕЧІЇ КОРПУСУ ТА ПІДЙМАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ

Для отримання залежності продуктивності засобу 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 о. Зяцьке. Метою експерименту було визначення маси сапропелю, що подається засобом за одиницю часу при варіюванні таких факторів як: тиск нагнітання повітря, товщина шару сапропелю та довжина підймального 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  $G^{\text{дф}} = 0,313 < G^{\text{табл}}(0,05; 15; 2) = 0,335$  [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 досліду  $f_1 = 2$  становило  $t = 4,3$  [51].

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

У результаті, рівняння регресії набуло вигляду:

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

Перевірку гіпотези адекватності отриманого рівняння регресії проводили за критерієм Фішера. Розрахункове значення даного критерію при дисперсії неадекватності  $S_{\text{над}}^2 = 3,102$  і дисперсії відтворюваності досліду  $S_y^2 = 0,028$  становило  $F^{\text{дф}} = 2,189$ . Табличне значення критерію Фішера за прийнятого 5% значущості, згідно [51], склало:

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

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

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

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

Остаточно рівняння регресії із факторами у натуральному вигляді 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 підймального трубопроводу, м.

Для відслідкування динаміки зміни продуктивності за отриманим рівнянням регресії були побудовані поверхні відгуку (рис. 4.6).

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'єднаються, що призводить до формування бульбашкової структури руху середовища, а у підймальному 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 зворотний рух сапропелю. Це означає, що дане явище підпорядковується снарядній структурі руху повітряносапропелевого потоку [3, 121].

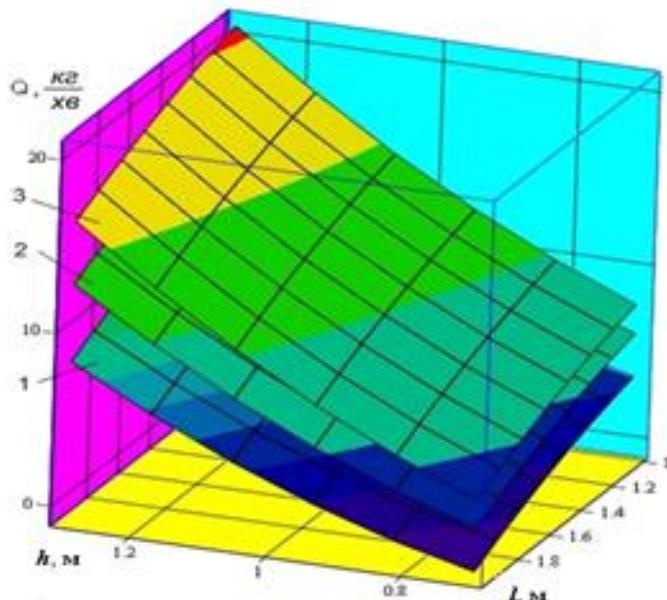


Рис. 4.25. Залежність продуктивності  $Q$  забірного пристрою від глибини залягання сапропелю  $h$  та довжини трубопроводу  $l$  при тиску нагнітання повітря: 1 –  $P=100$  кПа; 2 –  $P=200$  кПа; 3 –  $P=300$  кПа

Аналіз отриманих результатів показує, що всі досліджувані фактори мають суттєвий вплив на продуктивність засобу. У всіх варіантах досліду за збільшення тиску повітря продуктивність засобу збільшується незалежно від глибини залягання сапропелю та довжини підймального трубопроводу. За збільшення глибини залягання сапропелю, у досліджуваних межах, продуктивність засобу зростає, оскільки на поклади діє сила ваги верхніх шарів. Збільшення довжини підймального трубопроводу спричинює часткове зменшення продуктивності засобу. 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. РЕЗУЛЬТАТИ ВИРОБНИЧИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗАСОБУ ДЛЯ ДОБУВАННЯ САПРОПЕЛЮ ІЗ ПНЕВМАТИЧНИМ ЗАБІРНИМ ПРИСТРОЄМ

Для отримання математичної моделі процесу добування сапропелю засобом із пневматичним забірним пристроєм було реалізовано чотирьохфакторний 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 чотирьохфакторного 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  $G^{df} = 0,222 < G^{tab}(0,05; 27; 2) = 0,318$  [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 досліду  $f_1 = 2$  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  $F^{df} = 11,178$  при дисперсії неадекватності  $S_{\text{над}}^2 = 0,00385$  і дисперсії відтворюваності  $S_y^2 = 0,0003444$ .

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

$$F^{tab}(0,05; f_2; f_1) = 19,42,$$

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

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

Оскільки  $F^{df} = 11,178 < F^{tab}(0,05; f_2; f_1) = 19,42$ , то гіпотеза адекватності рівняння регресії підтверджується.

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



Рис. 5.3. Фото реалізації експерименту на озері Заяцьке

Остаточно рівняння регресії із факторами набуло вигляду:

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

За отриманим рівнянням регресії (5.16) було побудовано поверхні відгуку та їх двомірні січення (рис. 5.4 – 5.7) для відслідковування 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  $P_h < 400$  кПа з використанням малих діаметрів піднімального трубопроводу  $d < 0,055$  м являється не раціональним, оскільки призводить до зниження продуктивності засобу. Збільшення тиску до  $P_h = 500$  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  $P_h = 400$  кПа, а діаметра піднімального трубопроводу  $d > 0,055$  м (рис. 5.6).

Використання кута нахилу твірної конусоподібного корпуса  $\alpha$  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 корпуса  $\alpha = 25^\circ$  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  $P_h$ , 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.

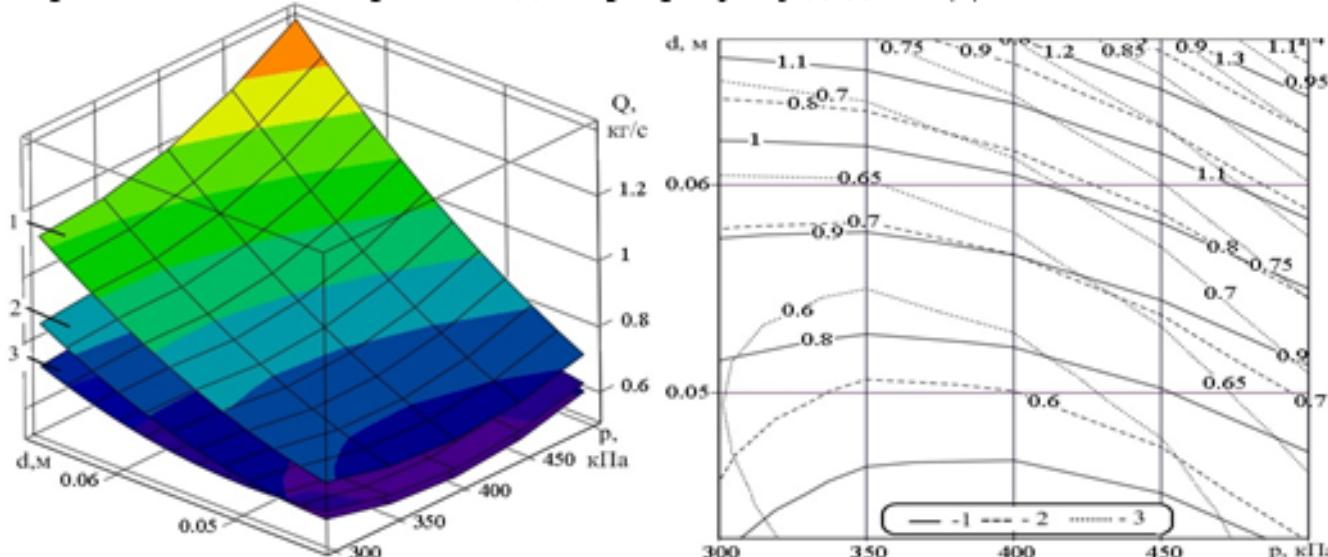


Рис. 5.4. Залежність продуктивності засобу  $Q$  від тиску нагнітання повітря  $P_h$  та діаметру підймального трубопроводу  $d$  при куті нахилу твірної корпуса  $\alpha=25^\circ$  і довжині підймального трубопроводу 1 –  $l=1,5$  м; 2 –  $l=3$  м; 3 –  $l=4,5$  м

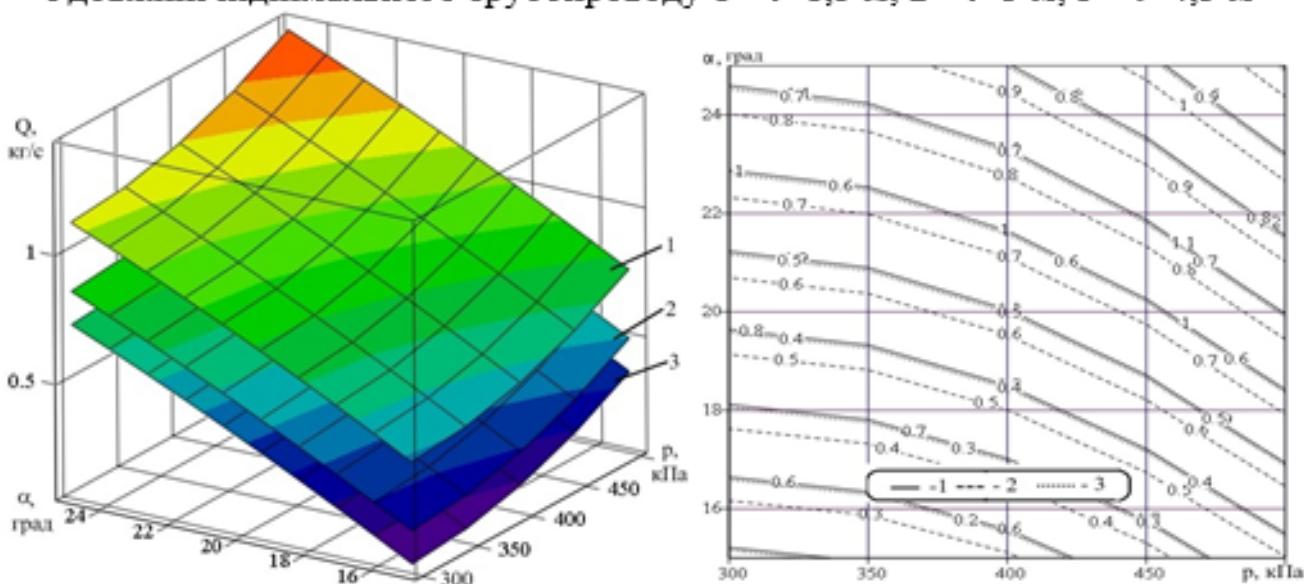


Рис. 5.5. Залежність продуктивності засобу  $Q$  від тиску нагнітання повітря  $P$  та кута нахилу твірної корпуса  $\alpha$  при діаметрі підймального трубопроводу  $d=0,067$  м і довжині підймального трубопроводу 1 –  $l=1,5$  м; 2 –  $l=3$  м; 3 –  $l=4,5$  м

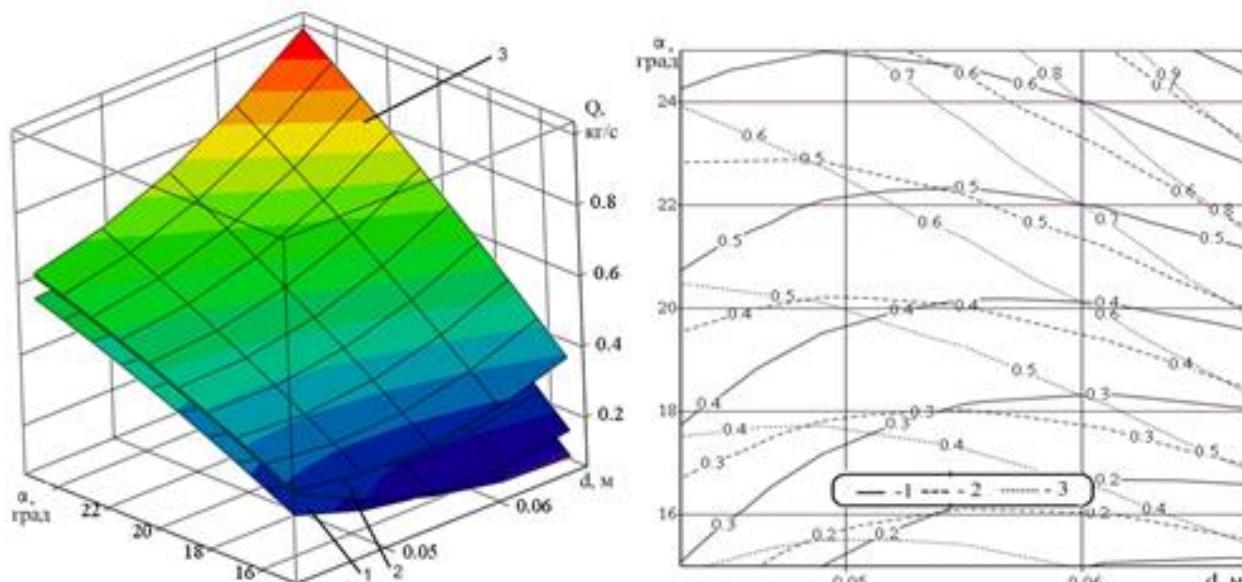


Рис. 5.6. Залежність продуктивності засобу  $Q$  від діаметра підйомального трубопроводу  $d$  та кута нахилу твірної корпуса  $\alpha$  при довжині підйомального трубопроводу  $l=4,5$  м і тиску нагнітання повітря: 1 –  $P_H=300$  кПа; 2 –  $P_H=400$  кПа; 3 –  $P_H=500$  кПа

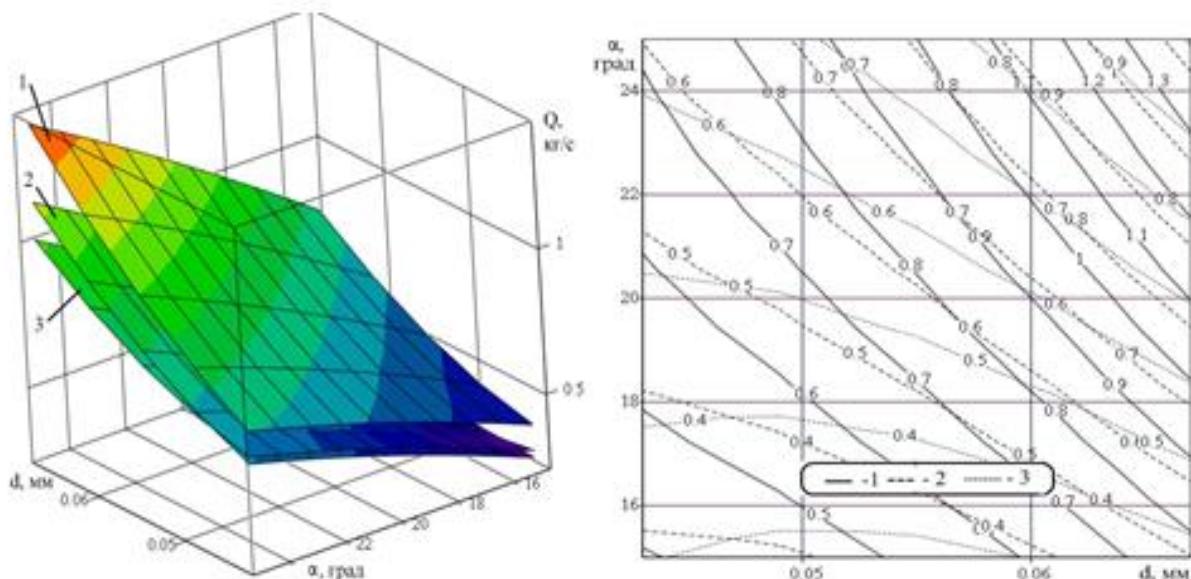


Рис. 5.7. Залежність продуктивності засобу  $Q$  від діаметра підйомального трубопроводу  $d$  та кута нахилу твірної корпусу  $\alpha$  при тиску нагнітання повітря  $P_H=500$  кПа і довжині підйомального трубопроводу: 1 –  $l=1,5$  м; 2 –  $l=3$  м; 3 –  $l=4,5$  м

#### 4.8. 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 замін 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 добувного 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	Машини	
		Базова	Нова
1	2	3	4
Продуктивність агрегату або машини за годину змінного часу т/год.	W <sub>zm</sub>	20	5
Балансова вартість машини, грн.	V <sub>m</sub>	80000	14800
Річне завантаження машини, год.	T <sub>pm</sub>	4160	4160
Чисельність виробничого персоналу, чол:			
основного	L <sub>осн</sub>	1	1
допоміжного	L <sub>доп</sub>	2	1
Годинні тарифні ставки, грн./люд.год:			
основного	t <sub>осн</sub>	20	6,75
допоміжного	t <sub>доп</sub>	14	6,75
Коефіцієнт, що враховує доплати:			
основного персоналу	k <sub>досн</sub>	1,1	1,1
допоміжного персоналу	k <sub>ддоп</sub>	1	1
Коефіцієнт відрахувань на реновацію	a <sub>m</sub>	0,14	0,14
Коефіцієнт відрахувань на поточний ремонт і технічне обслуговування	Г <sub>тм</sub>	0,14	0,14
Коефіцієнт відрахувань на капітальний ремонт	Г <sub>км</sub>	0,021	0,021
Витрата електроенергії, кВт·год/т.	q	0,4	0,012
Ціна 1 кВт електроенергії, грн.	Ц	1,58	1,58
Затрати на зберігання машини, що припадають на 1 годину експлуатаційного часу, грн./год.	Z <sub>збм</sub>	0,02	0,02
Нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень	E	0,15	
Коефіцієнт гарантії споживачу економічного ефекту	б	0,8	
Коефіцієнт переведення оптової ціни в роздрібну	d	1,1	

Таблиця 5.2

## 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
- реновацию	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 викорис- тання 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.

#### 4.9. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Дослідження фізичних властивостей сапропелю о. 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  $\gamma = 1010 \dots 1285$  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 о. 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 розпушенння покладів пониженої вологості доцільно використовувати завихрений повітряний потік. Завихрення досягається за горизонтального розташування осі отвору подачі повітря із діаметром у діапазоні 1...1,5 мм та надлишкового тиску подачі  $P=300 \dots 400$  кПа. А під час добування покладів, що не вимагають попереднього значного розпушення, доцільно використовувати отвори із кутом нахилу їх осі до горизонту 45°.

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

9. Суттєвий вплив на продуктивність засобу для добування сапропелю із пневматичним забірним пристроєм мають: тиск подачі повітря, глибини

залигання сапропелю з якої ведеться добування та довжина підймального трубопроводу (потрібна висота підймання сапропелю). За збільшення тиску повітря, продуктивність забірного пристрою збільшується, незалежно від глибини залигання покладів та довжини підймального трубопроводу. За збільшення глибини залигання сапропелю, у досліджуваних межах, продуктивність пристрою зростає, а збільшення довжини підймального трубопроводу над рівнем водного дзеркала спричинює часткове зменшення даного показника.

10. За робочого тиску подачі повітря  $P=100\ldots300$  кПа, товщина шару сапропелю з під якої ведеться добування  $h=0,7\ldots1,3$  м та довжини підймального трубопроводу  $l=1,0\ldots2,0$  м спостерігається снарядний режим руху висхідного повітряно-сапропелевого потоку.

11. 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 підймального трубопроводу  $l=1,5$  м. Але для добування покладів із високою концентрацією органічної речовини доцільно використовувати трубопроводи довжиною  $l=3,5\ldots4,5$  м. У такому випадку продуктивність засобу складатиме  $Q=0,9\ldots1,1$  кг/с за тих же енергетичних затрат.

12. 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 монографії 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 забірного 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 забірного 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  $W=95\pm1\%$ , за тиску нагнітання  $P_n=500\text{kPa}$  досягає 0,08м, а для сапропелю із  $W=90\pm1\%$ , даний показник складає 0,055м. Також встановлено, що охоплення повітряного потоку конічним корпусом забезпечуватиметься за кута нахилу твірної конуса у межах  $\alpha_k=20\dots30^\circ$ .

3. На основі теоретичних досліджень технологічного процесу добування сапропелів виведені аналітичні залежності для визначення продуктивності забірного пристрою. Отримана залежність максимальної теоретичної продуктивності пневматичного забірного пристрою вказує на те, що добування сапропелю слід вести із глибини у межах  $H=3\dots5\text{m}$  при тиску подачі повітря  $P_n=400\dots500\text{kPa}$ . Встановлено, що для забезпечення формування у конічному змішувачі забірного пристрою стійкого снарядного режиму руху повітряно-сапропелевої суміші його висота повинна знаходитись у межах  $h_k=0,18\dots0,32\text{m}$ , кут нахилу твірної корпусу –  $\alpha_k=20\dots30^\circ$ , діаметр вхідного та вихідного отворів –  $D_0=0,3\dots0,4\text{m}$  та  $D_s=0,09\dots0,14\text{m}$  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  $\eta=135,52\dots1,98\text{Pa}\cdot\text{s}$  за гідростатичного тиску  $P_n=200\text{kPa}$ . Особливо значний вплив на в'язкість сапропелю чинить зміна швидкості деформацій зсуву у межах  $u=0,005\dots0,2\text{m/s}$ . Експериментальні дослідження траєкторій 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  $P_h=100\ldots 300$  кПа, товщини шару сапропелю вологістю  $W=90\ldots 85\pm 1\%$ , з-під якого ведеться добування  $l=0,7\ldots 1,3$  м та довжини піднімального трубопроводу  $h_m=1,0\ldots 2,0$  м спостерігається снарядний режим руху висхідного повітряно-сапропелевого потоку.

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

8. На основі комплексу теоретичних і експериментальних досліджень розроблено нову конструкцію забірного пристрою засобу для добування сапропелю і встановлено його раціональні конструктивно-технологічні параметри. Запропонована методика процесу руху повітряного потоку в середовищі сапропелю і визначення продуктивності процесу.

9. Запропоновані нові перспективні конструкції забірних пристрій пневматичної технології, які пристосовані до розробки різних типів родовищ сапропелю, будь-якої глибини залягання без побічного втручання у навколишнє середовище.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А.с. № 637554 СССР, МКИ F04F 1/20. Эрлифтная установка для перекачивание 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, Ю.А. Рыжков (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. посібник / В.О. Аністратенко, В.Г. Федоров. - К.: Вища шк., 1993. – С. 375.
5. Богусловский Н.М. Псевдоожижение 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. Воларович М.П. Определение предельного напряжения сдвига торфа методом конического пластометра / М.П. Воларович, 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. изл 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. Андрошук, 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. 36. 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. – Минск: Наука и техника, 1983. – С. 182.
28. Кислов Н.В. Пневмоуборка торфа из расстила / Н.В. Кислов, В.И. Бакшанский. – Минск: Наука и техника, 1983. – С. 86.
29. Кислов Н.В. Физические и аэродинамические свойства измельченного торфа / Н.В. Кислов; под. ред. Олейка Ф.А.– Минск: 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 Сумського державного університету. Серія – Технічні науки. – Суми: СДУ, №1 – 2009. – С. 34-42.
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. Псевдоожижение / 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. Рошин. – 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., Польчина 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, Лукьяненков И.И., Минеев В.Т. 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 Луцький нац. техн. ун-т. - № u200512720; Заявл. 28.12.2005; Опубл. 15.06.2006. Бюл. №б. – С. 3.
54. Пат. 2289656 Російська Федерація, МПК E02F 3/88. Грунтозаборное устройство земснаряда / Ареф'єв Н.Н., Тарапова О.Н.; заявитель и патентообладатель Ареф'єв Н.Н., Тарапова О.Н. - № 2004124420/03; Заявл. 10.08.2004; Опубл. 20.12.2006 Бюл. №35. – С. 10.
55. Пат. 2295611 Російська Федерація, МПК E02F 3/88. Плавучая установка для глубоководного извлечения грунта / Дементьев В.А., Казаков О.Е., Кожевников Н.Н., Ялтанец И.М.; заявитель и патентообладатель Дементьев В.А. - № 2004132925/03; Заявл. 12.11.2004; Опубл. 20.03.2007 Бюл. №8. – С. 6.
56. Пат. 2298068 Російська Федерація, МПК E02F 3/88. Комплекс для добычи сапропеля / Тараков Ю.Д.; заявитель и патентообладатель Гос. образов. учрежд. высш. профессион. образов. „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. Грунтозаборное устройство земснаряда / Ареф'єв Н.Н.; заявитель и патентообладатель Ареф'єв 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. Грунтозаборное устройство земснаряда / Ареф'єв Н.Н.; заявитель и патентообладатель Ареф'єв 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. техн. ун-т. – №u200810917; заявл. 05.09.2008; опубл. 26.01.2009, Бюл. №2.
61. Константінов Ю.М. Технічна механіка рідини і газу: Підручник / Ю.М.

62. Пат. 41406 Україна, МПК F04F 1/20. Газліфт / Триллєр Є.А., Надєєв Є.І., Калиниченко В.В., Ганза А.І., Немцєв 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. Ґрунтозабірний 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., Суховецький 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. техн. 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. техн. ун-т. – №u201112474; заявл. 24.10.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. №15.
67. Пат. 7202 Україна, МПК E21C50/00, E02F3/12. Ґрунтозабірний 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. Ґрунтозабірний 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. Ґрунтозабірний 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. Аннисского. – 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 компрессорные установки» / Б.С. Фотин, И.Б. Пирумов, И.К. Прилуцкий, П.И. Пластиинин; 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.]. – Мин.: 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. Пневмогидротранспорт в химической промышленности / И.М. Разумов – М.: Химия, 1979. – С. 248.
77. Разумов И.М. Псевдоожижение и пневмотранспорт сыпучих материалов / И.М. Разумов – М.: Химия, 1964. – С. 160.
78. Розенбаун Р.Б. Движение тел в псевдоожижонном 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. Рацковская. – М.:–Л.: Химия, 1964. – С. 288.
82. Романков П.Г. Сушка во взвешенном состоянии: конструкция, теория, расчет / П.Г. Романков, Н.Б. Рацковская. – 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. – Мин.: 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 перероб. 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. Спива-

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. экрана.
100. Тодос О.М. Апраты 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, грунтов 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 несущейся 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 пневматичного забірного пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич, І.Є. Цізь // Сільськогосподарські машини:

36. 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: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2013. – С. 404-412.

111. Хомич С.М. Дослідження пневматичного забірного пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич, І.Є. Цизь / Тези ХХIII-ої науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу "Актуальні проблеми та перспективи науки і виробництва" (технічний напрямок). – 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) забірного пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич // Промислова гіdraulіка і пневматика. Вип. 3(37). Вінниця: Вінницький НАУ – 2012. – С. 95-96.

114. Хомич С.М. Порівняльна ефективність пневматичних пристрій для добування озерних сапропелів / С.М. Хомич, І.Є. Цизь // Матеріали IX-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 забірного пристрою для добування сапропелю / С.М. Хомич // Матеріали XX 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 забірного 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., Миллионников М.Д., Симонов Л.А. – М., 1948. – С. 148.
121. Хюйтт Дж. Кольцевые двухфазные течения / Хюйтт 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: Навчально-науковий відділ Луцького національного технічного університету, 2012. – С. 146-147.
123. Цизь І.Є. Результати експериментальних досліджень продуктивності пневматичного забірного 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 забірного пристрою для добування сапропелю / І.Є. Цизь, С.М. Хомич // Тези XXV-ої науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу "Актуальні проблеми та перспективи науки і виробництва" (технічний напрямок). – Луцьк: Навчально-науковий відділ 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 седиментометра / 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 якість та перспективи використання / М.Й. Шевчук. – Луцьк: Надстир'я, 1996. – С. 383.
131. Muller H.G. An introduction to food rheology / H.G. Muller. – London, 1973. – Р. 148.
132. Report Rothamsted experimental station for 1963. – Harpenden, 1964. – Р. 318.
133. Sorterberg A. Yield and phosphorus uptake / A. Sorterberg // New ideas and Technologies in utilization peatlands and peat. - Poznan, 1976, V.5. – Р. 7-14.
134. 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. – Р. 67-72.

Міністерство освіти і науки України

**Хомич Сергій Миколайович, Цизь Ігор Євгенович**

Наукове видання

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАСОБУ ДЛЯ  
ПНЕВМАТИЧНОГО ДОБУВАННЯ САПРОПЕЛЬЮ**

**Монографія**

Редакційно-видавничий відділ

Луцького національного технічного університету

Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК № 4123 від 28.07.2011 р.

Редактор: С.М.Хомич

Комп'ютерний набір та верстка: С.М.Хомич

Підписано до друку . . . 2016 р.

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.

Ум. друк. арк. 10,25. Обл.-вид. арк. 10,0.

Наклад 300 прим. Зам. № .

Друк – РВВ ЛНТУ, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК № 4123 від 28.07.2011 р.

**Хомич С.М.**

Дослідження та обґрунтuvання параметрів засобу для пневматичного добування сапропелю:  
Монографія / С.М. Хомич, І.Є. Цизь. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2016. – 132 с.

ISBN 978-617-672-021-8

В монографії представлені відомості про окремі фізичні та механічні властивості озерного сапропелю як об'єкта органічних добрив, що використовуються в сільському господарстві. Проаналізовано технології та засоби для добування органічних сапропелів, які знаходяться під шаром води. Представлено теоретичне узагальнення і нове технічне вирішення науково-прикладної задачі, яка полягає у добуванні сапропелю природної вологості шляхом формування повітряно-сапропелевої суміші у забірному пристрой із подальшим підніманням на надводну поверхню з метою зниження енергетичних витрат на отримання добрив, а також збереження і відродження природних екосистем водойми та мінімізації екологічних наслідків.

Рекомендується науковцям, аспірантам, студентам та інженерним працівникам, які займаються питаннями добування озерних сапропелів.

УДК 631.3:621:695:553:973(043.3)

ББК: 41.47