

Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу

На правах рукопису

**Камаєва Інесса Олегівна**

УДК 504.61:622.012(477.86)

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ГІРНИЧО-ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ В  
УМОВАХ АЕРОТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ  
( на прикладі Калуського промислового району)**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

**Дисертація**

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник

Семчук Ярослав Михайлович

доктор технічних наук,

професор

## ЗМІСТ

Стор.

<b>ВСТУП .....</b>	<b>5</b>
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВПЛИВУ ГІРНИЧО-ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ТА ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>	<b>9</b>
1.1. Вплив вітчизняних та зарубіжних калійних виробництв на довкілля .....	12
1.2. Коротка характеристика основних компонентів довкілля Калуського промислового району .....	18
1.2.1. Повітряне середовище .....	18
1.2.2. Геологічне середовище .....	24
1.2.3. Водне середовище .....	29
1.3. Висновки з розділу та основні задачі досліджень .....	32
<b>РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА КАЛІЙНИМИ ВИРОБНИЦТВАМИ .....</b>	<b>34</b>
2.1. Теоретичні відомості про аеротехногенне забруднення навколишнього середовища .....	34
2.2. Дослідження пилового забруднення атмосфери солевідвалами Домбровського кар'єру .....	42
2.2.1. Розробка математичної моделі пилового забруднення атмосфери .....	45
2.3. Моделювання розсіювання аерозолів шкідливих речовин в атмосфері .....	53
2.3.1. Математична модель розповсюдження аерозолів (димових газів) .....	54

2.3.2. Методика визначення рівня забруднення приземного шару атмосфери .....	62
2.3.3. Моделювання динаміки розповсюдження шкідливих речовин на межі системи “повітря–грунт” .....	74
2.4. Побудова поля ризику від точкового джерела небезпеки при неконтрольованих (аварійних) викидах шкідливих речовин .....	78
2.5. Інструментальні дослідження забруднення атмосфери калійними виробництвами у польових умовах .....	86
2.6. Підбір методик для визначення концентрації шкідливих речовин .....	88
2.7. Висновки з розділу .....	90

### **РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

#### **АЕРОТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ЗОНИ АЕРАЦІЇ**

#### **СОЛЕВІДВАЛАМИ ДОМБРОВСЬКОГО КАР’ЄРУ .....**

3.1. Теоретичні та експериментальні дослідження формування ареалів забруднення ґрунтів .....	91
3.1.1. Лабораторний аналіз процесів дифузії в глинистих ґрунтах .....	95
3.1.2. Вивчення процесів водопроникності глинистих ґрунтів експериментальним шляхом.....	98
3.1.3. Дослідження ареалів забруднення ґрунтів у польових умовах .....	100
3.2. Теоретичні та експериментальні дослідження процесів формування ареалів сольового забруднення підземних вод .....	103
3.2.1. Математична модель міграції забруднених речовин у підземних водах .....	103
3.2.2. Експериментальні дослідження процесів засолення ґрунтових вод мінералізованими розчинами.....	109
3.3. Висновки з розділу .....	115

<b>РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ТА ЗАСОБІВ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ СТОСОВНО ВІДХОДІВ КАЛІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА</b> .....	118
4.1. Розробка технології та способу очистки атмосферного повітря від пилу на дробильно-сортувальних комплексах .....	118
4.2. Природоохоронні заходи при реконструкції та розташуванні нових калійних виробництв .....	130
4.3. Висновки з розділу .....	137
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	138
<b>ДОДАТКИ</b> .....	140
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	162



## ВСТУП

**Актуальність теми.** До сучасних глобальних проблем людства належать екологічні проблеми, яким надається першочергове значення. Серед них значне місце займають проблеми екології, які пов'язані із діяльністю гірничо-хімічних підприємств.

Серед значної кількості різновидів впливу на довкілля калійних виробництв на Прикарпатті екологічну небезпеку створюють пилове та димове забруднення, що формуються як внаслідок безпосереднього надходження з джерел викидів у процесі переробки та транспортування калійних руд (первинне), так і шляхом вітрової ерозії солевідвалів в місцях їх складування (вторинне). Істотну небезпеку складають солевідвали Домбровського кар'єру, в які заскладовано близько 40 млн. т соленосних порід із вмістом галіту (NaCl) до 70 % і які займають площу понад 80 га родючих земель. Солевідвали є джерелом пилового сольового забруднення атмосфери, ґрунтів, поверхневих і підземних вод.

Аналіз попередніх досліджень дає підстави стверджувати, що проблема аеротехногенного забруднення в районі дії гірничо-хімічних підприємств розглядається вперше у даній роботі, а саме: даний вид забруднення є найбільш екологічно небезпечним, оскільки охоплює всі компоненти навколишнього середовища. У зв'язку з цим у дисертації вирішується актуальне науково-практичне завдання – встановлення особливостей формування екологічної небезпеки в районі розташування гірничо-хімічних виробництв, виявлення масштабів їх впливу на довкілля та розроблення заходів із забезпечення екологічної безпеки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана згідно Постанови Кабінету Міністрів України від 31.08.1999 р. №1606 “Про концепцію поліпшення екологічного становища гірничодобувних регіонів України” та “Програмами екологічної реабілітації гірничовидобувних регіонів України” та у відповідності з господарсько-договірною тематикою №530/2006 з НПС “Долина” філії МН “Дружба” ВАТ “Укртранснафта”.

**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є розробка та реалізація науково-технічних рішень з підвищення екологічної безпеки в межах території впливу гірничо-хімічних підприємств в умовах аеротехногенного забруднення довкілля.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні завдання:

- провести аналіз сучасних досягнень із вирішення проблеми екологічної безпеки в районах розташування гірничо-хімічних виробництв;
- розробити методику на основі математичного моделювання для прогнозування рівня аеротехногенного забруднення компонентів навколишнього середовища;
- оцінити масштаби аеротехногенного забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод шляхом польових та експериментальних досліджень;
- розробити заходи зі зменшення впливу викидів шкідливих речовин калійних виробництв;
- удосконалити метод очищення повітря робочої зони від пилу під час транспортування і в процесі переробки калійних руд та випробувати у виробничих умовах автоматизовану установку для боротьби з пилом.

**Об'єктом дослідження** є процеси розповсюдження хімічних забруднювачів в районі розташування гірничо-хімічних виробництв.

**Предметом дослідження** є джерела аеротехногенного забруднення довкілля в районі розташування гірничо-хімічних виробництв.

**Методи дослідження.** Теоретичні та практичні методи досліджень ґрунтуються на застосуванні системного підходу до оцінювання стану екологічної небезпеки в умовах аеротехногенного забруднення навколишнього середовища. Відповідно до цього в роботі застосовувались такі методи: математичне моделювання – для прогнозування оцінки масштабів пилового і димового забруднення територій, розрахунку розсіювання шкідливих речовин; фізичне моделювання – для вивчення фільтраційних та дифузійних процесів у ґрунтах; інструментальні дослідження – для визначення рівнів техногенної небезпеки безпосередньо на калійних виробництвах та населених пунктах. Адекватність розроблених моделей дійсним результатам оцінювалась шляхом порівняння даних, отриманих в результаті натурних досліджень.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у такому:

- удосконалено наукові основи оцінки екологічної небезпеки гірничо-хімічних підприємств із врахуванням пилового та димового аеротехногенного забруднення довкілля за результатами моніторингу забрудненої території;

- вперше для прогнозування масштабів аеротехногенного забруднення територій побудовано математичну модель процесу гравітаційно-дифузійного розсіювання частинок з врахуванням їх геометричних і фізичних властивостей та числа Рейнольдса;

- вперше для оцінки рівня забруднення території на межі системи “повітря – ґрунт” розроблено математичну модель із використанням спрощеної схеми методу скінченних елементів;

- дістав подальший розвиток метод побудови поля ризику від точкового джерела забруднення під час неконтрольованих (аварійних) викидів шкідливих речовин та отримано поверхню розподілу ймовірностей потенційної небезпеки;

- удосконалено метод очищення повітря від пилу під час транспортування та у ході перевантажування калійних руд.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у можливості використання результатів теоретичних та практичних досліджень дисертаційної роботи для гірничопромислових комплексів, зокрема в районах розробки та переробки калійних руд, не тільки на Прикарпатті, але і в інших регіонах. Практична цінність дисертації полягає в застосуванні методик для визначення рівня забруднення приземного шару атмосфери, водоносного горизонту. Власне, розроблені математичні моделі розсіювання шкідливих речовин дають змогу оперативно оцінити масштаби забруднення територій, що зазнали аеротехногенного впливу не тільки при лімітованих викидах, але і при аварійних. Винайдено спосіб очищення повітря від пилу під час транспортування та в процесі переробки калійних руд (деклараційний патент України №21750 від 15.03.2007 р.). Даний спосіб та методика розрахунків при знятті вимірів у процесі відбору пилу з газоочисних та аспіраційних систем будуть використані під час реконструкції калійних виробництв ВАТ “Гірхімпром”.

**Особистий внесок здобувача** полягає у безпосередній його участі на всіх етапах виконання робіт – від формування завдань до експериментальних досліджень. В опублікованих у співавторстві роботах автору належать: аналіз досліджень впливу гірничо-хімічних виробництв на навколишнє середовище [58, 60, 64, 78, 79, 87, 120, 121]; розроблення математичних моделей розсіювання шкідливих речовин у приземному шарі атмосфери та при забрудненні ґрунтів і ґрунтових вод [71-76, 83-85, 96, 98, 99, 100, 122]; формування завдання та проведення експериментальних досліджень процесів фільтрації розчинів різної мінералізації, конвективної та молекулярної дифузії [108, 130, 131], випробовування автоматизованої установки [133]. Крім цього, автор дисертації брала безпосередню участь у проведенні польових робіт у ході інженерно-геологічних та гідрогеологічних досліджень.

**Апробація роботи.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на 12 Міжнародних конференціях: “Галицька земля: історія та сучасність” (м. Івано-Франківськ, 1998р.); “Наука і освіта '99” (м. Дніпропетровськ, 1999р.); “Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів” (м. Донецьк, 1999р.); науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу університету (м. Івано-Франківськ, 2000р., 2001р., 2002р.); “Нафта і газ України - 2002” (м. Київ, 2002р.); “Безпека життєдіяльності” (м. Харків, 2002р.); “Україна наукова” (м. Дніпропетровськ, 2003р.); “Екологічні проблеми нафтогазового комплексу” (м. Київ, 2003р.).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 27 наукових праць, а саме: 15 статей, серед яких 10 – у фахових науково-технічних виданнях та збірниках, затверджених ВАК України, 11 тез доповідей – у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій. Крім цього, одержано патент на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та переліку використаних джерел із 142 найменувань. Загальний обсяг дисертації 176 сторінок і включає 41 рисунок, 17 таблиць та 3 додатки на 22 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВПЛИВУ ГІРНИЧО-ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ТА ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Україна за рівнем розвитку свого мінерально-сировинного комплексу (МСК), який включає запаси, прогнозні ресурси, видобуток та переробку корисних копалин, входить в десятку провідних держав світу. До економічної кризи в Україні щорічно видобувалось 1 млрд т сирих мінеральних продуктів, що складало 20 т в перерахунку на одну людину [1, 2]. Негативним моментом діяльності потужного МСК є несприятливі екологічні наслідки. Крім гірничо-видобувної промисловості техногенний прес на навколишнє середовище збільшують хімічна промисловість, теплоенергетика та інші галузі народного господарства, які розташовані поблизу гірничо-видобувних підприємств. Внаслідок цього об'єм забруднень, що припадає на 1 км<sup>2</sup> території України, в 6,5 рази перевищує рівень США та в 3,2 рази – рівень розвинутих європейських країн.

Гірничопромислове виробництво здійснює найбільш сильний техногенний вплив на довкілля. Але в різних регіонах України характер та ступінь техногенних навантажень на навколишнє середовище, а відповідно і його трансформація, не однакові і залежать, в основному, від масштабу покладів, а відповідно, й масштабів гірничої маси, що видобувається та переробляється; хімічно-мінерального складу видобувної гірничої маси; технології збагачення та переробки корисних копалин.

Одним із джерел викидів на гірничо-хімічних підприємствах, що забруднює повітряний басейн, є пил. Крім пилу, в атмосферу ще викидаються різні шкідливі газоподібні речовини, які утворюються, головним чином, в процесах сушки та обпалювання руд. Пил, який утворюється в атмосфері кар'єрів, проммайданчиків шахт і фабрик відрізняється за своїм мінералогічним, дисперсним та хімічним складом. Мінералогічний склад пилу, що утворюється в кар'єрах і шахтах, як правило, близький до мінералогічного складу розроблюваних порід. Але разом з тим

потрібно враховувати, що на його склад впливають виробничі процеси, пов'язані з виділенням шкідливих газів. Це пов'язано з тим, що технологічні процеси шахт і кар'єрів (наприклад, вибухові роботи, робота автотранспорту, станків термічного буріння) сприяють адсорбції шкідливих газів та парів на поверхні пилу. За даними досліджень, проведених на шахтах Кривбасу, пил, утворений під час масових вибухів, містить до 0,0185 мг/г оксиду вуглецю і до 0,036 мг/г оксидів азоту, а на кар'єрах – до 0,219 мг/г оксидів азоту та сліди оксидів вуглецю. На більшості гірничих підприємств значну загрозу для здоров'я становить захворювання працівників силікозом, яке пов'язане з вдиханням пилу, який містить вільний діоксид кремнію [3, 4].

Негативні наслідки техногенних навантажень на навколишнє середовище від діяльності гірничо-промислових виробництв України описані в публікаціях [5-8]. Наприклад, в Донбасі наслідками діяльності вугільної промисловості є викиди забруднюючих речовин, що становлять на 1 км<sup>2</sup> 59,9 т (2001 р.). В результаті гірничих та переробних робіт утворюються багатооб'ємні терикони, відвали, просадки, що є рельєфоутворюючим фактором. Це призводить до часткового перерозподілу гідросітки, місцевої зміни рози вітрів, клімату, а також режиму і хімічного складу підземних вод. Горіння териконів, їх вітрова та водна ерозія сприяють забрудненню атмосфери, ландшафтів, поверхневих і підземних вод, що призводить до масштабного відторгнення продуктивних земель. В Середньому Придніпров'ї (Криворізький залізорудний та Нікопольський марганцеворудний басейни) забруднення довкілля пов'язано з поверхневими гірничими роботами.

Крім цього, результати досліджень з проблеми охорони довкілля у гірничо-видобувних регіонах викладені у роботах О.М. Адаменка [9,10], Ф.М. Бочевера і А.Є. Орадовської [11,12], В.М. Гольдберга [13], В.М. Мироненка [14,15], В.М. Лялька [16], Г.І. Рудька [17,18], В.М. Шестакова [19,20], В.М. Шестопалова [21] та інших. Більшість із них присвячена встановленню масштабів забруднення поверхневих та підземних вод при розробці рудних, нафтових і газових родовищ. Кількість публікацій з вивчення впливу джерел забруднення калійних виробництв на навколишнє середовище обмежена. Серед них можна виділити роботи

зарубіжних та вітчизняних вчених: В.К. Ліпницького [22,23], Г.В. Бельтюкова [24], Г.І. Рудька [25], Я.М. Семчука [26-28], П.К. Гаркушина [29], Е.Д. Кузьменка [30], Л.Є. Шкіци [31,32], а проблема аеротехногенного забруднення в районах дії калійних підприємств ставиться вперше у даній роботі.

Сировинна калійна база України зосереджена на Прикарпатті. Прикарпатський соленосний басейн простягається смугою довжиною 280 км, шириною 20-30 км від Польщі до Румунії (рис. 1.1).

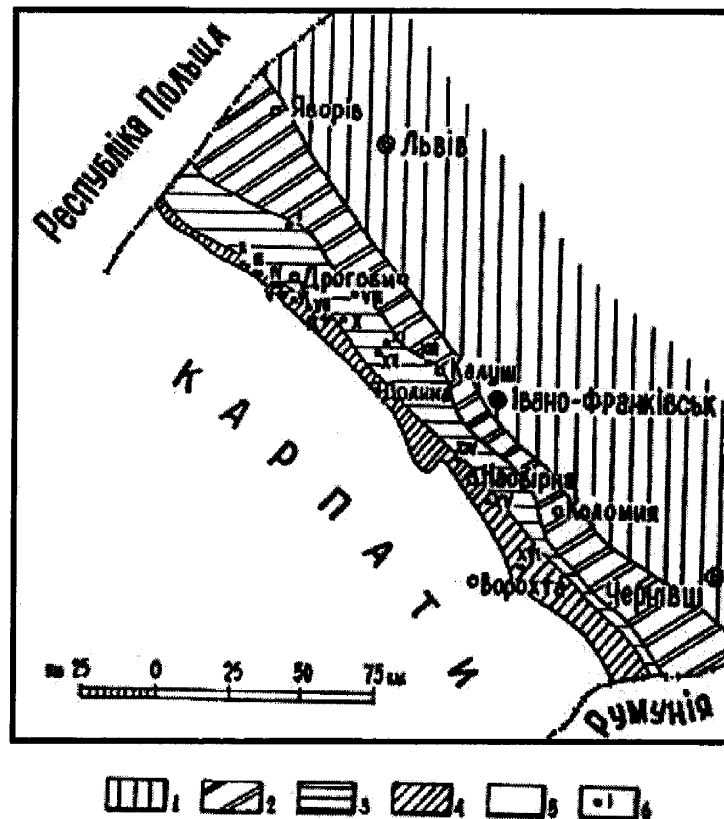


Рис. 1.1. Схема розміщення калійних родовищ Прикарпаття:

1 - Російська платформа. Передкарпатський прогин; 2 - Зовнішня зона, Внутрішня зона; 3 - Самбірський покрив; 4 - Бориславо-Покутський покрив; 5 - Карпати; 6 - калійні родовища: I - Велика Белина; II - Блажівське; III - Ясениця Сольна; IV - Бориславське; V - Стебницьке; VI - Уличнянське; VII - Гірне; VIII - Нежухівське; IX - Ніневське; X - Моршинське; XI - Тура Велика; XII - Тростянецьке; XIII - Калуш-Голинське; XIV - Марково-Росільнянське; XV - Делятинське; XVI - Ославське

Запаси калійних руд розвіданих і опошукваних площ складають більше 7,2 млрд. т. Прикарпатські калійні руди є полімінеральними, містять більше 20 видів хлоридних, хлоридно-сульфатних і сульфатних мінералів калію, натрію, магнію і кальцію. Крім того, в них містяться рідкі і малокларкові елементи, збагачуючи якими можна одержати добрива з вмістом мікроелементів згідно з вимогами споживачів. На базі калійних руд Прикарпаття одержують, подрібнюючи їх, мінеральне добриво – каїніт природний ( $K_2O$  – 9%,  $MgO$  – 5%, сірки – 6%, натрію – 14%), який більше століття використовується у сільському господарстві.

Розробка та переробка калійних руд супроводжується значним впливом на довкілля. Власне, у Калуському промисловому регіоні розташована велика кількість підприємств, що являють собою стаціонарні джерела - забрудники довкілля (рис. 1.2). Із них значна кількість припадала на ВАТ “Оріана”, у межах якого знаходяться: джерела пилового забруднення (солевідвали Домбровського кар’єру, виробництва з переробки калійних руд) та джерела димового забруднення (магнієве виробництво).

### **1.1. Вплив вітчизняних та зарубіжних калійних виробництв на довкілля**

Однією із особливостей розробки калійних руд є відносно низький вміст у них корисного компоненту і, як наслідок, великий об’єм відходів при їх переробці і одержанні кінцевого продукту – мінеральних добрив. Витяг відходів при переробці руди знаходиться на рівні 60-70%. Таким чином, із кожної тони руди після її переробки утворюється 0,6-0,7 т відходів, які представлені в основному хлористим натрієм (галітові відходи) та солевими шламами (мул, гіпс).

В залежності від способу переробки і збагачуванні калійних руд відходи складують на поверхні землі у вигляді териконів – солевідвалів, а шлами - у хвосто- і шламосховища. Крім цього, при відкритій розробці калійних солей, яка вперше проводиться на Калуш-Голинському родовищі, на земній поверхні розміщують розкривні соленосні породи у відвали, а розсоли вилуговування атмосферними опадами соляних уступів відвалів і кар’єру розміщують у акумулюючі басейни.



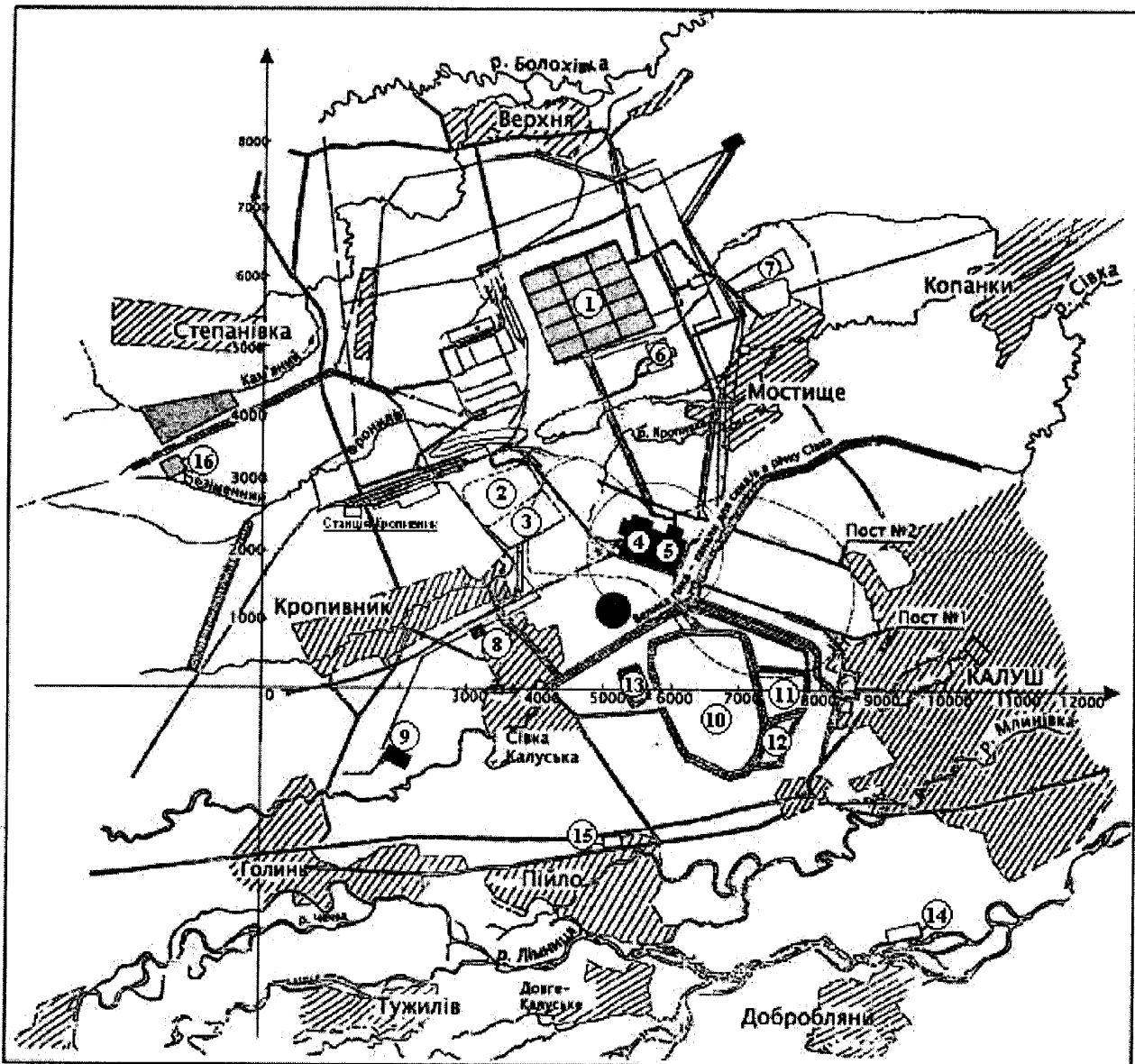
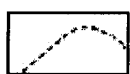


Рис. 1.2. Карта розташування джерел забруднення калійних виробництв Калузького промислового району. Масштаб 1:95000

1 - площадка хімічного виробництва; 2 - хвостосховище №2; 3 – хвостосховище №3; 4 - хімфабрика; 5 - магнієвий завод; 6 - ТЕЦ; 7 –золошлаковідвал; 8 - шахта “Нового Голинь”; 9 - майданчик головного та допоміжного створів рудника; 10 - Домбровський кар’єр; 11 - відвал №1; 12 - відвал №4; 13 - акумулюючий басейн; 14 - господарсько-питний водозабір на р. Лімниця; 15 - водосховище для водопостачання на р. Чечва; 16 - полігон поховання відходів



Нормативна санітарно-захисна зона



Розсіювання хлору при несприятливих метеоумовах у випадку максимального викиду

Заскладовані на земній поверхні відходи калійних виробництв є необмеженим джерелом сольового забруднення компонентів навколишнього середовища. Основними забруднювачами є хлориди, які піддаються вітровому розсіюванню, дифузійній і фільтраційній міграції, засолюють геологічне середовище.

Вітровий знос солей з поверхні солевідвалів і шламосховищ та пилогазові викиди в атмосферу комплексів збагачувальних фабрик впливають в основному на ґрунти. Розсіювання солей проходить по переважаючому напрямку вітрів на відстань до 2-3,5 км від джерела забруднення [33]. Солі накопичуються у верхньому рослинному шарі потужністю до 2 см. У періоди дощів рослинний шар, у тій чи іншій мірі, розсолюється в залежності від проникності підстилаючих відкладів і інтенсивності поверхневого стоку. В умовах відносно низької активності промивання ґрунтів, які сформувалися на слабопроникних відкладах, вони відчують прогресуюче засолення, особливо на рівнинних та слабо дренованих територіях. Ареали вітрового забруднення в районах розміщення калійних підприємств розповсюджуються на великі площі. Так, наприклад, в районі діяльності калійних підприємств 1, 2 і 3-го рудоуправління ВО “Білоруська лій” вони розвинуті на площі більше 1000 га, що складає біля 2% території шахтних полів. На територіях, які піддалися впливу вітровому забрудненню, вміст солей підвищується у 4-10 разів. Це викликає пригнічення рослинності, знижує врожайність посівів на 30-50 % [33].

Особливо негативно впливає діяльність калійних підприємств на гідрохімічний режим поверхневих і підземних вод [34]. У межах Старобинського родовища (Білорусь) проходить засолення підземних вод мезозойсько-кайнозойського водоносного комплексу, який є основним джерелом водопостачання Солігорського промислового району. Водоносний комплекс складає зону активного водообміну. Процеси засолення водоносного комплексу виникли в зв'язку із складуванням на поверхні землі твердих сольових відходів і мінералізованих розсолів. Загальна площа солевідвалів на ВО “Білоруська лій” перевищує 2,5 км<sup>2</sup>, шламосховищ – 2,4 км<sup>2</sup> [34]: в них заскладовано біля 150 млн.т галітових і 200 млн.т шламових відходів.

Складування і відкрите зберігання на поверхні землі легкорозчинних галітових відходів, в умовах вологого клімату, супроводжуються постійним утворенням у солевідвалах і хвостосховищах високомінералізованих (до  $350 \text{ г/дм}^3$ ) розсолів, які характеризуються високою міграційною здатністю, і які змінюють гідрохімічний режим поверхневих і підземних вод. Так, із західної сторони хвостовитща 1-го рудоуправління в результаті фільтрації розсолів через неекрановану основу хвостосховища у водоносному горизонті утворився ареал засолення (рис. 1.3), в якому мінералізація підземних вод збільшилася в порівнянні з фоновою в десятки разів і досягла  $15,5 \text{ г/дм}^3$ .

Ареали засолення розширюються, переважно, в напрямку потоку підземних вод і діючих водозаборів, які розміщені недалеко від осередків забруднення. Так, за даними геофізичних досліджень [35], в районі 1-го рудоуправління при середніх швидкостях руху ареалів засолення  $5\text{-}10 \text{ м/рік}$  їх величини зростають у напрямку місцевих дрен до  $25\text{-}33 \text{ м/рік}$ . З великою інтенсивністю розповсюджуються процеси засолення в неоген-палеогенових відкладах, в яких мінералізація підземних вод на периферії ареалів засолення у  $2\text{-}7$  рази вища, ніж в четвертинних відкладах.

Засоленню підземних вод сприяють процеси осідання і деформації земної поверхні над відробленими виробками. Осідання земної поверхні, згідно роботи [36], супроводжується зсувами і тріщинами, а також змінами інженерно-геологічних властивостей порід. Наприклад, після відробки другого і третього рудних горизонтів, на поверхні землі були зафіксовані провальні воронки і відкриті тріщини; розкриття останніх складало від декількох міліметрів до  $5\text{-}10 \text{ см}$ , причому по найбільш розкритих тріщинах відмічені уступи із зсувом країв по вертикалі на  $10\text{-}20 \text{ см}$ . Викликане деформаціями збільшення проникності гірничого масиву привело до прогресуючого засолення підземних вод на глибину і по площі зі швидкістю від  $10$  до  $70 \text{ м/рік}$  [35]. Засолення охопило верхні водоносні горизонти міжморенних флювіоглянціальних відкладів дніпровсько-московського, березінсько-дніпровського і неоген-палеогенового віку на глибину  $100\text{-}120 \text{ м}$  аж до покрівлі верхнекрейдових відкладів, які є відносним регіональним водоупором для названих вище водоносних горизонтів. При цьому мінералізація на глибині  $30 \text{ м}$

(перший водоносний горизонт) досягнула  $35 \text{ г/дм}^3$  при фоновому вмісті  $0,3 \text{ г/дм}^3$ , а на глибині 50 м (другий водоносний горизонт) –  $95 \text{ г/дм}^3$  [34].

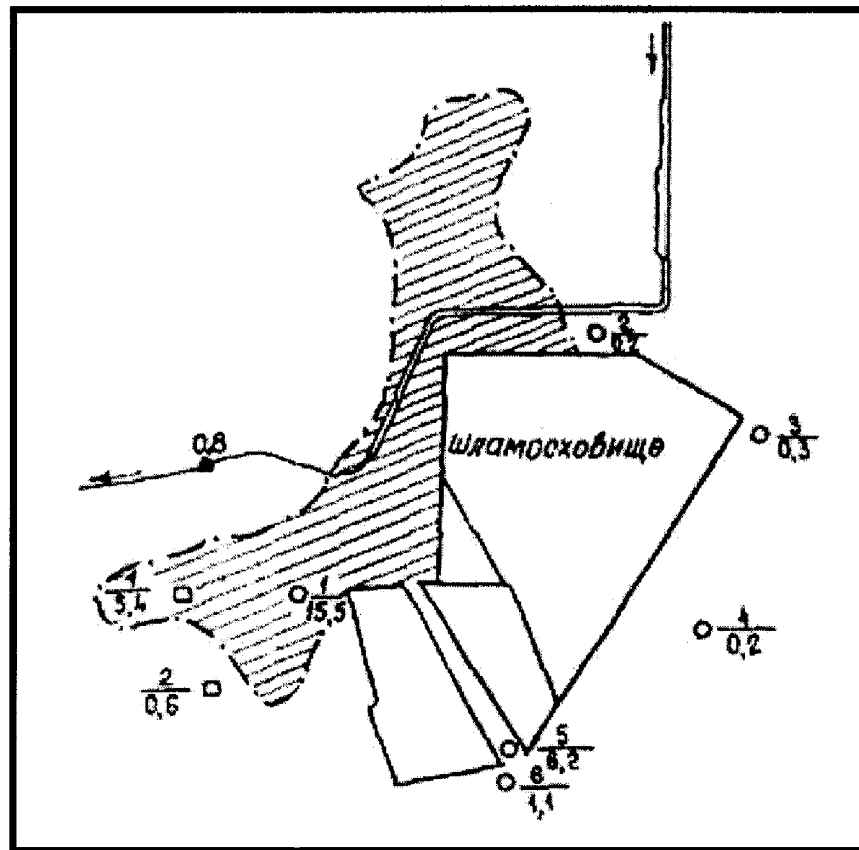






Рис. 1.3. Ареал засолення підземних вод у районі шлямосховища І-го рудоуправління ВО "Білоруськалій" [25]

1  2  3  4 

1 - ареал засолення підземних вод;

2 - спостережні свердловини (в чисельнику номер, в знаменнику мінералізація води,  $\text{г/дм}^3$ );

3 - колодязь (в чисельнику номер, в знаменнику - мінералізація води,  $\text{г/дм}^3$ );

4 - місця відбору проб води у водотоках і мінералізація води.

На шахтах Верхнекамського родовища калійних солей Уралу гідрохімічна обстановка також ускладнюється впливом калійних виробництв. До початку

експлуатації шламосховищ і солевідвалів водоносні комплекси строкато-кольорової і теригенно-карбонатної товщі вміщали прісні гідрокарбонатні кальцієві води з мінералізацією 0,2-0,3 г/дм<sup>3</sup>. При експлуатації родовища в гідротехнічних спорудах, які використовуються для зберігання твердих галітових відходів і глинисто-солевих шламів, величина мінералізації накопичених розсолів коливається від 250 до 280 г/дм<sup>3</sup>. У сольовому складі розсолів переважають хлориди натрію (до 70 екв.%) і хлориди калію (до 25 екв.%). На території родовища втрата розсолів складає: із шламосховищ - до 2 млн.м<sup>3</sup>/рік, а з площ складування солевідходів (солевідвалів) - 0,5 млн.м<sup>3</sup> в рік. Розсоли засолюють в основному породи і підземні води строкато-кольорової і теригенно-карбонатної товщі, які відносяться до зони активного водообміну, потужність якої в районі досягає 200 м [36].

Перші ознаки засолення шламосховищем БКПРУ-1 верхньої частини водоносного горизонту були зафіксовані ще в 1982 році [23]. Сліди розсолів були виявлені північніше шламосховища на відстані 2000 м, а у 1983 році почалось прогресивне підвищення мінералізації води в р. Зирянці і в Верхнекамському водосховищі, розміщеному в 3,5 км на північ від шламосховища. Поперечні розміри ареала ростуть у напрямку підземного потоку: ширина області засолення підземних вод від джерела забруднення до місць їх природного розвантаження збільшується приблизно у 2-2,5 рази (відповідно від 800 до 2500 м) при віддалі між басейном промстоків і рікою біля 3500 м.

У профільній будові ареалу відмічена суттєва неоднорідність гідрохімічного розрізу, причому найбільш сильну деформацію міграційний потік терпить недалеко від джерела забруднення. У цій зоні - на відстані до 800-1000 м від шламосховища - чітко виражені зміни мінералізації як по горизонталі, так і по вертикалі.

Значний вплив на геологічне середовище відбувається на калійних підприємствах Ельзасу (Франція), де проходить засолення ґрунтових вод хлоридами калію і натрію [37]. Засолення ґрунтових вод тут проходить, в основному, за рахунок скидання розсолів в ріки. Впливає також інфільтрація розсолів із солевідвалів і хвостосховищ в підстилаючі водопроникні породи. Так, в одній із

свердловин поблизу солевідвалу мінералізація підземних вод на глибині 4-6 м складала 44 г/дм<sup>3</sup>, а на глибині 24-26 м - 90 г/дм<sup>3</sup>.

Переробка полімінеральних руд Стебницького калійного родовища у Прикарпатті супроводжувалась великою кількістю промислових стічних вод високої мінералізації. Частина їх після освітлення у хвостосховищі використовувалась в технологічному процесі, а решта промислових стоків накопичувалась у хвостосховищі. Хвостосховище являє собою ємність біля 7 млн.м<sup>3</sup>, площею 65 га і введено в експлуатацію в 1966 році. У хвостосховищі перед початком аварії було зібрано 6 млн.м<sup>3</sup> розсолів. Великомасштабне засолення поверхневих і підземних вод зв'язане з аварією на хвостосховищі у вересні 1983 р., коли в результаті руйнування тіла дамби пройшов прорив розсолів в кількості 5 млн.м<sup>3</sup>, з мінералізацією 250 г/дм<sup>3</sup>. Розсоли досягли р.Дністра, в районі с.Миколаєва Львівської області, і по ньому досягли греблі Ново-Дністровського водосховища, яка затримала біля 1 млн.т солей [38]. Під час аварії загинуло 920 т товарної риби і 1300 т мальків. Внаслідок цієї аварії пройшло значне засолення підземних вод у районі сіл Раневичі, Почаєвичі і Михайловичі, які розміщені на схід і північний схід у 12 км від м.Дрогобича.

У межах Калуш-Голинського родовища на земній поверхні складують тверді і рідкі відходи від переробки калійних руд, а також розкривні соленосні породи Домбровського кар'єру, які є необмеженим джерелом сольового забруднення довкілля і масштаби цього процесу будуть розглянуті у наступних розділах дисертаційної роботи.

## **1.2. Коротка характеристика основних компонентів довкілля Калуського промислового району**

**1.2.1. Повітряне середовище.** Промислові калійні виробництва Калуша знаходяться у зоні помірного клімату з підвищеною вологістю.

Серед багатьох екологічних проблем до однієї з особливо важливих треба віднести проблему забруднення незамінних природних ресурсів, до яких відноситься повітря.

Особливо велике значення питання охорони повітряного басейну має для промислових районів, де розміщено багато підприємств хімічної промисловості, теплоенергетики і інших галузей, які мають великі викиди шкідливих речовин в повітря, а також для курортних регіонів. Підприємства калійної підгалузі України розміщені саме в таких районах.

Як і переважна більшість підприємств інших галузей виробництва, калійні підприємства не мають в наш час безвідходних технологій переробки калійних руд на добрива. Тому справа очищення викидів стоїть на першому місці серед заходів по боротьбі із забрудненням атмосфери. Непомірне навантаження на навколишнє середовище за попередні роки призвело до того, що викиди деяких шкідливих речовин перевищують дозволені значення (табл. 1.1). В цій таблиці особливо виділяються такі джерела забруднення: солевідвали Домбровського кар'єру (п. 1), підприємства з транспортування та переробки калійних руд (п. 2,3) та магнієве виробництво (п. 4-18).

Внесок різних підприємств у ці значення в багатьох випадках завуальований, бо одні і ті ж речовини, які викидаються різними підприємствами, накладаються одна на одну і відтворюють тільки загальний фон. Тому на даному етапі необхідно проводити постійний контроль за викидами кожного джерела забруднення і на основі порівняння розробляти заходи по зменшенню викидів шкідливих речовин у повітряний басейн.

Отримання достовірної інформації про загальне забруднення повітряного басейну, джерел забруднення, прогнозування впливу виробництва і врахування його наслідків на повітряне середовище можливе тільки при систематичному спостереженні і контролі концентрації шкідливих речовин в повітрі.

Основну роль при аеротехногенному забрудненні довкілля відіграє інтенсивність вітру. Карта аеротехногенного впливу Калуського магнієвого заводу наведена на рисунку 1.4.

**Якісний і кількісний склад викидів у повітряний басейн виробництв  
Калуського промислового району**

№ п/п	Шкідлива речовина	Кількість шкідливих речовин, т/рік			
		виділялося від усіх джерел	поступало на очищення	не очищувалося	викидалося в атмосферу
1	Пил солевідвалів	-	-	-	49400
2	Пил лангбейніто- каїнітової руди	197,547	197,547	-	9,78
3	Пил калімагnezії	134062,59	134044,48	18,11	385,3
4	Оксиди азоту	16,938	-	16,938	16,938
5	Оксид вуглецю	16,5893	-	16,5893	16,5893
6	Сірчистий ангідрид	0,605	-	0,605	0,605
7	Соляна кислота	0,00275	-	0,00275	0,00275
8	Фториди	0,0007	-	0,0007	0,0007
9	Фтористий водень	0,0005	-	0,0005	0,0005
10	Тверді частинки	0,810	-	0,810	0,810
11	Титан і двоокис титану	0,00004	-	0,00004	0,00004
12	Сполуки кремнію	0,0007	-	0,0007	0,0007
13	Аміак	7,2409	-	7,2409	7,2409
14	Акріламід	0,0515	-	0,0515	0,0515
15	Зварювальна аерозоль	0,3488	-	0,3488	0,3488
16	Азотна кислота	0,000115	-	0,00115	0,00115
17	Сірчана кислота	0,0005	-	0,0005	0,0005
18	Нітрил акрілової кислоти	0,002	-	0,002	0,002



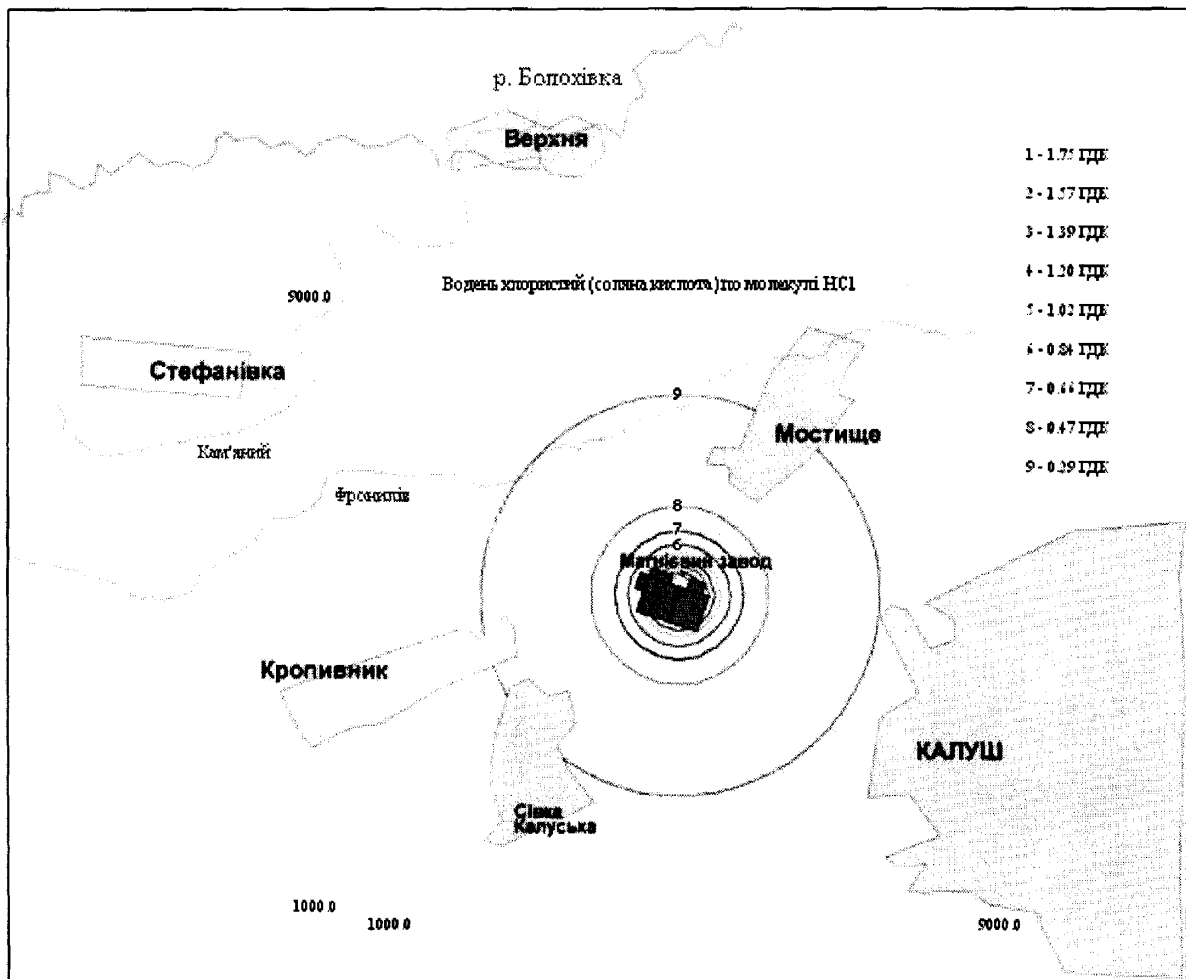


Рис. 1.4. Карта аеротехногенного впливу Калуського магнієвого заводу.

Масштаб 1:80000

Регіон характеризується порівняно невеликими швидкостями вітру при середньорічній 3-3,5 м/с. Активність вітру ( $H_v$ ) у певний період часу можна визначити за формулою [39]:

$$H_v = \frac{100 \cdot m_v}{m_v + m_M}, \% \quad (1.1)$$

де  $m_v$ ,  $m_M$  – відповідно число випадків вітру у даний термін спостереження за певний період за багатолітніми даними і число випадків штилю.

Найбільша активність вітру спостерігається у перехідні періоди року, а протягом доби у 15-18 годинах, найменша – у вересні, жовтні, грудні, січні та у

нічний період (3-6 годинах). Рози вітрів як для різних періодів року, так і за рік у цілому, мають один і той же характер. Переважаючий напрям вітрів ПдЗх, ПнЗх, Зх, Сх, ПдСх (табл. 1.2) [40].

Таблиця 1.2

**Річна повторюваність напрямку вітру**

Напрямок вітрів	Пн	ПнСх	Сх	ПдСх	Пд	ПдЗх	Зх	ПнЗх
Повторюваність напрямку вітру, %	4,0	2,0	17,0	15,0	6,0	20,0	17,0	19,0

Вітри даних напрямів максимальні і за величиною – середньорічні 3,2-4,7 м/с. Середньорічна роза вітрів у районі розміщення промислових калійних виробництв у Калуському районі показана на рисунку 1.5, з якого видно, що найбільш ймовірними напрямками руху частинок є північно-західний і особливо південно-західний. В цих напрямках шкідливі частинки можуть переміщуватися на досить великі відстані від джерела викидів. В інших напрямках процес розповсюдження буде більш "застійним", що пояснюється характером зміни напрямку, а також кількісним співвідношенням напрямку вітру.

У різні періоди року найбільш вірогідні наступні напрями переносу пилових та димових викидів: в теплий період викиди найчастіше поширюються у південно-західному, західному та північно-західному напрямках, а в зимовий період – у південно-східному та східному. Відмітимо, що пилове забруднення взимку можливе тільки при відсутності снігового покриву на солевідвалах.

Однією із відмінних кліматичних рис району є підвищення вологості атмосфери. Річний, середньомісячний та добовий хід відносної вологості повітря за багаторічними даними має виражений характер з максимумами у грудні (85,4%) і мінімумами у квітні-травні (72,8-73,6%).

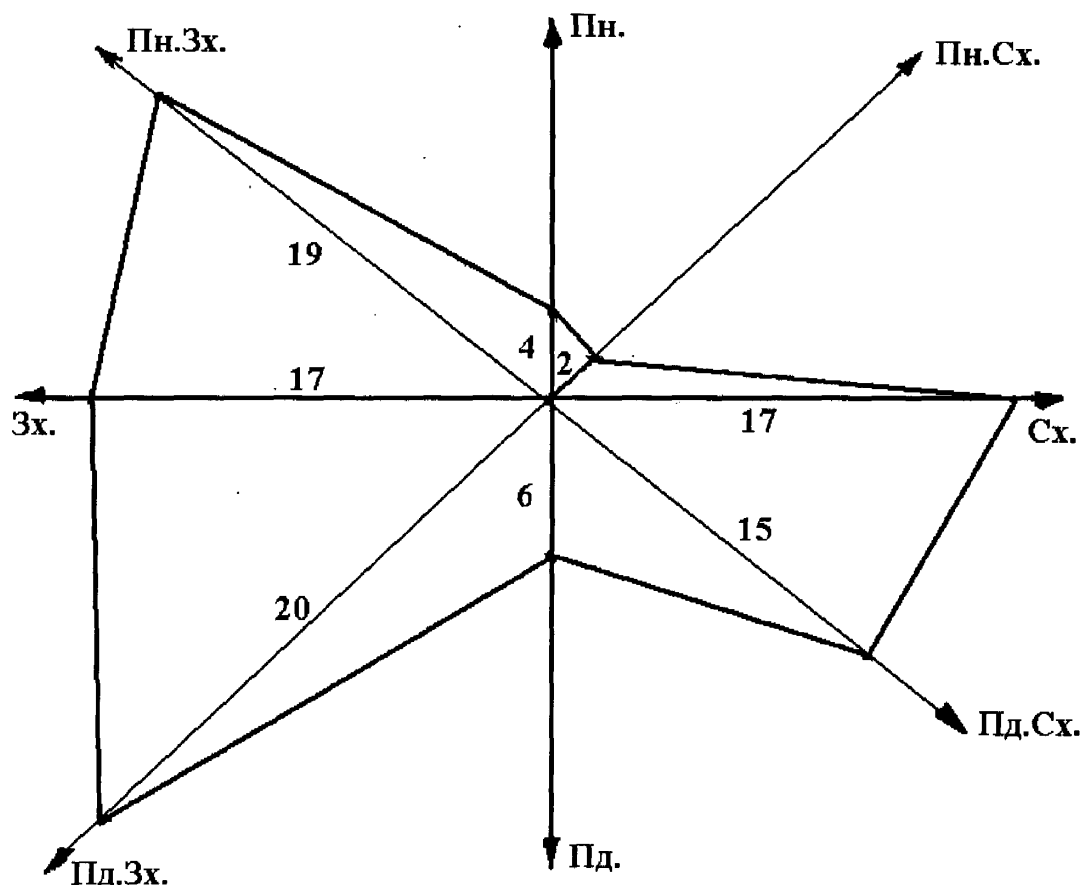


Рис. 1.5. Середньорічна роза вітрів у районі розміщення промислових калійних виробництв у Калуському промисловому районі

Середньорічна кількість опадів складає 718,9 мм. Опади переважно у вигляді дощу. Максимальна кількість опадів випадає у червні-липні (113-114 мм), а мінімальна – листопаді-лютому (34,2-27,2 мм). Середньорічна температура ґрунту дорівнює +8,1 °С. Промерзання ґрунту за зимовий період досягає 0,2-0,4 м. Річна різниця температур ґрунту і повітря для району складає +0,6°С. Аналіз мікроклімату показує, що добовий хід активності вітру співпадає з ходом температури повітря і має обернений характер ходу відносної вологості та повторності штилю.

Відмітимо, що критична відносна вологість повітря, при якій відбувається інтенсивна адсорбція вологи на частинках пилу і їх швидкий внаслідок цього осад на поверхню землі, дорівнює 71,6 %. За багаторічними опосередкованими даними вологість повітря нижче критичної практично спостерігається у період

максимальних температур (12-18 годин) другої половини весни, літом та першої половини осені.

Відсутність суцільної хмарності у нічні години обумовлюють активне охолодження земної поверхні та створення від'ємних вертикальних градієнтів температури повітря, тобто створюються умови для виникнення інверсій.

За багаторічними даними в даному районі така метеорологічна обстановка з великою вірогідністю може бути у зимові місяці, а також у жовтні, листопаді та березні, а протягом днів – у нічні, вечірні та ранні ранкові години. Це видно із графіків рис. 1.6 (заштриховані області).

**1.2.2. Геологічне середовище.** Калуський промисловий район Івано-Франківської області розташований у Зовнішній зоні Передкарпатського передового прогину.

Поклади калійних солей у районі простежуються у вигляді пластів і лінз потужністю 10-40 (рідше 60) м, завдовжки 2,5-3 км, на глибині 15-1000 м. Переважають найцінніші (сульфатні) видозміни калійних солей - каїніт, карналіт, лангбейніт, полігаліт, шеніт. Вміст  $K_2O$  - 10-11%.

Розробку Калуського родовища розпочато у 1827 р., перший переробний завод збудований у 1869 році.

Солі видобувались кар'єрним і шахтним способом до глибини 350 м (~2,5 млн.т щороку). Розвідані запаси до глибини 600 м становлять 475 млн.т (1986 р.). З солей родовища на ВАТ "Оріана" виробляють хімічні добрива, отрутохімікати, металічний магній, рідкий хлор, каустичну соду, технічну сіль, соляну кислоту, хлорвініл, поліхлорвінілові та карбамідні смоли тощо.

Родовище калійних солей представлене Калуською і Голинською групами і дільницями Кадобне, Пійло. В Калуську групу об'єднуються дільниці Західна і Східна Голинь, Сівка-Калуська і Домброво. Загальна площа родовища 80 км<sup>2</sup>. Розріз Калуш-Голинського родовища (знизу - вгору) представлений:

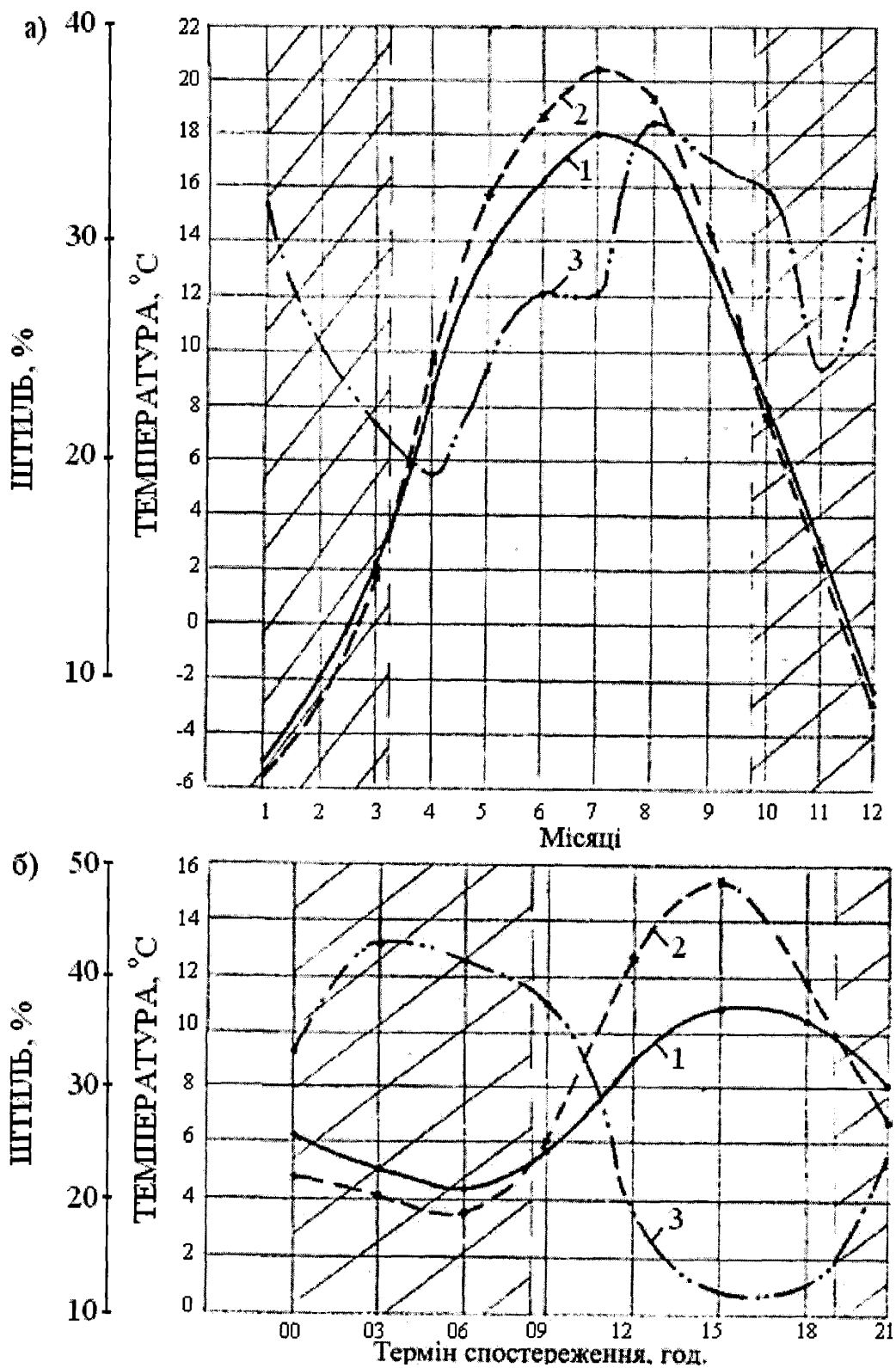


Рис. 1.6. Метеорологічна обстановка у Калуському районі

- 1 - зміни температури повітря: річна (а) та добова (б);
- 2 - температура поверхні землі;
- 3 - повторність штилю.

- а) юрсько-верхньокрейдовими відкладами мезозойського фундаменту зовнішньої зони прогину;
- б) тортонськими і частково нижньо-сарматськими відкладами Зовнішньої зони прогину (автохтонний комплекс порід);
- в) середньоверхньоміоценовими відкладами Внутрішньої зони прогину (алохтонний комплекс порід).

Юрські відклади з розмивом залягають на палеозойських. Повсюдно вони представлені сірими і жовтаво-рожевими вапняками з прошарками мергелів. Повна потужність - біля 550 м.

Верхньокрейдові відклади розчленовуються на породи сеноманського (піщаники), туронського (вапняки), сантонського, коньякського (мергелі), кампанського (кварцові пісковики) ярусів. Загальна потужність верхньокрейдових відкладів - 425 м. Вони залягають на розмитій поверхні верхньоюрських вапняків.

Юрсько-верхньокрейдові породи складають основу Зовнішньої зони Передкарпатського крайового прогину. В межах родовища поверхня цієї основи занурюється на південний захід, утворюючи блоки загальнокарпатського простягання.

Міоценові відклади Внутрішньої зони прогину представлені породами стебницької, балицької, богородчанської, тираської, косівської і дашавської світ. Стебницька світа складена розсланцьованими глинами, червоно-бурими, рідше сірими, зеленувато-сірими, і пісковиками. В фронтальній частині Калуського насуву ці відклади місцями відсутні, а на південному заході їх потужність поступово зростає, досягаючи 200-300 м.

Вище залягають калієносні відклади Калуської групи родовища гелветського або ранньотортонського, або пізньотортонського віку. У межах Калуш-Голинського родовища виділено 2 промислові пласти: нижній-сильвінітовий і верхній-каїніт-лангбейнітовий.

Вони мають загальне північно-західне простягання і південно-західне падіння під кутом 19-27°. Глибина залягання пластів від 16-20 до 85 м. У межах Калуш-

Голинського родовища залягають такі породи: каїнітова, лангбейнітова, каїніт-лангбейнітова, полігалітова, карналітова і сільвінітова.

Над продуктивною товщею залягають породи нижньотортонського віку. Вони представлені сірими, зеленувато-сірими і червоно-бурими глинами. Вище залягають породи богородчанської світи. Відклади представлені зеленувато-сірими глинами, мергелями з прошарками туфів і пісковиків. Перекривають відклади богородчанської світи триасові глини потужністю до 3 м. В межах Калуської антикліналі породи триасової світи перекриваються вербовецькими глинами косівської світи. На міоценових відкладах залягають породи гіпсо-глинистої шапки (ГГШ), які утворені в результаті змін соляних і соленосних порід під дією фізико-хімічних процесів. Загальна потужність порід ГГШ змінюється від 0,2 до 21 м. У вертикальному розрізі в породах ГГШ виділяються зони: а) верхня, гіпсо-глиниста; б) нижня, шеніт-мірабілітова.

Четвертинні відклади поширені повсюди. У верхній частині вони представлені “покривними суглинками”: а в нижній - піщано-гравійно-гальковими відкладами (“Карпатський галечник”). Суглинки бурувато-жовті, коричнево-сірі, ущільнені, у вигляді гнізд і дрібних лінзочок зустрічаються домішки піску. Іноді - прошарки піщаної глини, рідше прошарки глинистого піску. В подошві суглинків, на контакт з гальковими відкладами, спостерігаються домішки дрібного гравію, середній вміст якого по шару не перевищує 1%. За гранулометричним складом переважають середні пиловаті суглинки, широко розповсюджені важкі і легкі. Важкі суглинки залягають переважно у нижній частині розрізу. Потужність суглинків від 2,5 до 3,0 м в долинах рік і потічків до 14-15 м на водорозділах.

Піщано-гравійно-галькові відклади від глинистої до крупногравійної і валунної різниці порід. Гранулометричний склад їх різномірний. Вміст валунного матеріалу коливається від 1,2% до 10%; гальки - від 38,2% до 60%; гравійного - від 14,7% до 53,5%; піщаного - від 40 до 59%; пиловатих і глинистих частин - від 0,2 до 7,0%. Діаметр уламків досягає 150 мм і більше. Петрографічними дослідженнями встановлено, що уламки в основній своїй масі складаються з тонкозернистого

кварцового пісковика. Заповнювачем служить різнозернистий пісок і глинистий матеріал. Потужність галькових відкладів змінюється від 1-2 м до 18-20 м.

Четвертинні відклади перекриваються ґрунтами, що піддаються різного виду забрудненню. У даному регіоні розвинуті лучні, лучно-болотні, болотні та дернові ґрунти.

Лучні ґрунти утворились під лучною трав'янистою рослинністю на алювіальних відкладах річкових заплав в умовах високого (2-3 м) стояння рівня ґрунтових вод. Лучні ґрунти потрапляють під вплив тривалого затоплення і паводковими водами. Ґрунтоутворення тут ускладнюється акумуляцією алювіального матеріалу. У місцях, де відбувається нашарування делювію та елювію, вони шаруваті. Мають добре розвинений, але погано диференційований профіль. Гумусовий горизонт сягає глибини 20-40 см. Він темно-сірого кольору, дрібно-зернистої структури, ущільнений.

До глибини 60-100 см простягається перехідний горизонт темно-сірого кольору з буроватим відтінком, горіхоподібної структури, вологий, ущільнений, у нижній частині слабо оглеєний. Нижче залягає оглеєна материнська порода - алювіальні відклади різного механічного складу, часто шаруваті.

У лучних ґрунтах міститься в середньому 3,1 % перегною. Реакція ґрунтового розчину середньо- або слабокисла. Гідролітична кислотність невисока - в середньому близько 3 мг-екв. на 100 г ґрунту. Сума увібраних основ досягає 12,6 мг-екв. на 100 г ґрунту, а ступінь насичення основами 80%. Вони мають середні запаси рухомих форм поживних для рослин елементів. Лучні ґрунти мають досить високу природну родючість.

Лучно-болотні ґрунти залягають в днищах балок та заплавах річок і потоків. Формування їх відбувається в умовах постійного надмірного зволоження ґрунтовими і поверхневими водами. Ґрунтові води залягають на глибині 0,5-1,5 м. У зв'язку з цим у них повністю оглеєний перехідний горизонт. Мають високу потенційну родючість. У верхньому горизонті вони містять в середньому 5,3 % гумусу, часто до 8%. Реакція ґрунтового розчину слабокисла, гідролітична кислотність невисока.



Болотні ґрунти займають найбільш низькі рівні заплавл та днищ балок. Утворились вони в умовах постійного перезволоження неглибоко (0,3 - 0,6 м) залягаючими ґрунтовими водами, внаслідок чого весь їх профіль має виразні ознаки оглеєння.

Дернові - це слаборозвинені ґрунти прирічкових частин заплавл, які складені наймолодшим сучасним алювієм, слабозадерновані піски, дернові опідзолені ґрунти на спадистих та крутих схилах.

**1.2.3. Водне середовище.** В межах Калуської котловини підземні води приурочені головним чином до покривних суглинків, гравійно-галькових відкладів і порід гіпсо-глинистої шапки (рис. 1.7).

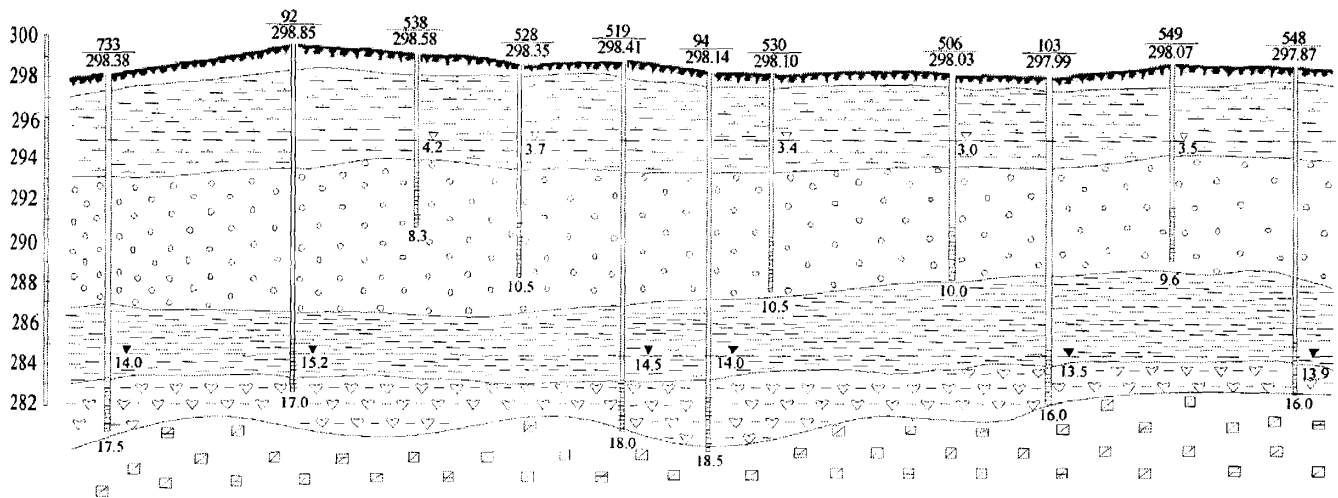
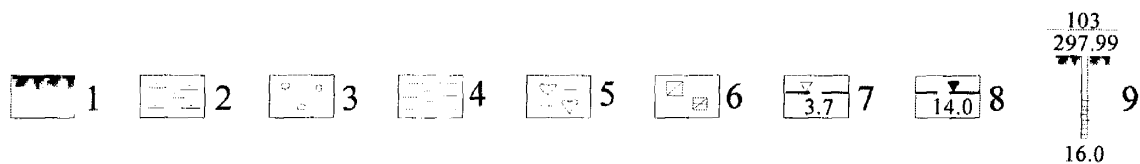


Рис. 1.7. Гідрогеологічний розріз в районі солевідвалів Домбровського кар'єру



1 - ґрунтово-рослинний шар; 2 - суглинок; 3 - гравійно-галькові відклади; 4 - породи гіпсо-глинистої шапки; 5 - породи шеніт-мірабілітової шапки; 6 - соляні та соленосні породи; 7 - відмітка рівня ґрунтових вод; 8 - відмітка рівня надсолевих розсолів; 9 - гідрогеологічна свердловина (в чисельнику – її номер, у знаменнику – абсолютна відмітка гирла свердловини)

До гравійно-галькових відкладів належить основний водоносний горизонт, який має повсюдне поширення. Фільтраційні властивості відкладів внаслідок нерівномірного вмісту піщано-глинистого матеріалу коливаються від 0,1 - 2,0 до 64 - 67 м/добу, а іноді досягають 150-250 м/добу. В більшості випадків коефіцієнти фільтрації не перевищують 5 м/добу. Питомі дебіти змінюються від 14 - 23 м<sup>3</sup> /добу до 1200-1500 м<sup>3</sup> /добу.

Водоносний горизонт на великій площі володіє напором, що зумовлений низькою водопроникністю покривних суглинків. Максимальні величини напорів характерні на ділянках із найбільшою потужністю суглинків і досягають 5 м. По напрямку до місцевих водотоків (ріки Сівка, Кропивник) величини напорів вод, приналежних до галькових відкладів зменшуються до 0,7 - 1,5 м. Води цього горизонту, не зачеплені техногенними факторами, в основному прісні з мінералізацією 0,2-1,0 г/дм<sup>3</sup>. Прісні води широко розповсюджені в межах Завадської і Войнилівської висот на північній і північно-східній площах Калуської котловини, а також у басейні ріки Лімниця. Солонуваті води розповсюджені в південній і північно-західній частинах Калуської котловини і належать до долини рік Сівка і Кропивник. Ґрунтові води мають гідравлічний зв'язок із надсолевими розсолами порід ГТШ. На локальних ділянках внаслідок розвантаження високомінералізованих надсолевих розсолів мінералізація ґрунтових вод у нижній частині досягає 10-45 г/л і більше.

За переважаючими компонентами прісні води переважно гідрокарбонатно-хлоридні кальцієво-натрієві, рідше - хлоридно-гідрокарбонатні натрієво-кальцієві. Тип вод сульфатний або хлоридний, рідше - гідрокарбонатний. Мінералізовані води за переважаючими компонентами хлоридно-гідрокарбонатні натрієво-кальцієві, рідше - хлоридно-натрієві з відносно підвищеним вмістом сульфат іону і іону магнію. Тип вод хлоридний або сульфатний.

Живлення водоносного горизонту галькових відкладів здійснюється за рахунок атмосферних опадів. Крім цього, запаси підземних вод галькового горизонту поповнюються і за рахунок поверхневих вод у період проходження повені на річках

і потічках. Розвантаження ґрунтових вод здійснюється переважно в напрямку загального стоку.

Ріки м. Калуша і території розташування промислових підприємств належать до басейну ріки Дністер. Це ріки Сівка, Млинівка, Кропивник, Кривець, Сапогів, Кам'яний, Фрунилів, Лімниця, Луква, Бережниця, на які значним чином впливають підприємства. Об'єктом впливу є також водна артерія Дністер, куди відбувається основний промисловий випуск скидів промислових підприємств. Коротка інформація про ріки досліджуваної території наведена у таблиці 1.3.

Група карпатських і передкарпатських рік своїми розгалуженими верхів'ями починається на північних схилах Карпатських гір на абсолютній висоті 700-1800 м, де річна сума атмосферних опадів становить 900-1500 мм. Середні й нижні їх течії протікають по Передкарпаттю, де також випадає багато атмосферних опадів (понад 700 мм). Долини їх вузькі і глибокі, русла кам'яністі, звичайно порожнисті, вкриті галькою і великих розмірів валунами. На виході з Карпат на Передкарпатську височину схил рік різко зменшується, швидкість течії також сповільнюється від 0,7 м/с біля виходу з гір до 0,1 м/с біля гирла. Долини рік звичайно широкі, дно і русла покриті галечниками, пісками та іншими крихкими наносами, причому чим ближче до гирла, тим розміри гальки і потужність галечника зменшуються, уступають місце піскам і річковому мулу.

Таблиця 1.3

### Характеристика основних рік промислової території м. Калуша

Назва	Куди впадає	Права чи ліва	Довжина, км	Площа басейну, км <sup>2</sup>
Сівка	Дністер	Права	76	595
Кропивник	Сівка	Ліва	26	72,1
Кам'яний	Болохівка	Права	13	23,2
Лімниця	Дністер	Права	122	1430
Млинівка	Дуба	Права	22	39
Бережниця	Урив	Права	23	76,8

Ріки одержують живлення, головним чином, дощове і снігове, ґрунтове живлення є додатковим. Снігові води живлять ріки з березня по травень, коли танення снігу поступово охоплює всю територію Передкарпаття і Карпати. У межах Передкарпаття частка снігового живлення невелика, оскільки сніговий покрив взимку надто нестійкий. У теплий період, коли випадає близько 80 % річної суми опадів, ріки одержують дощове живлення, однак в цей час більша кількість вологи витрачається на випаровування.

Гідрогеологічний режим рік дуже складний. Річний хід стоку і рівнів характерний різкими коливаннями, частими паводками, які спостерігаються у всі пори року: навесні - від танення снігу, влітку і восени — від випадання сильних дощів, взимку - внаслідок раптових відлиг, які супроводжуються дощами і таненням снігу в Передкарпатті. Карпатські ріки належать до рік із паводним режимом, тобто характерні систематичними і частими паводками у всі пори року. Стік їх за порами року в середньому розподіляється так: навесні (березень-травень) - 45 %, влітку (червень-серпень) - 22,4 %, восени (вересень-листопад) - 17,1 %, взимку (грудень-лютий) - 16,1 %. Середній багаторічний модуль стоку для рік Передкарпаття складає 10-12 л/с з 1 км<sup>2</sup>. Середня багаторічна витрата води становить 24-29 м<sup>3</sup>/с.

Взимку ріки, як правило, покриті льодом, але льодовий режим надто нестійкий і протяжність льодоставу звичайно невелика.

### **1.3. Висновки з розділу та основні задачі досліджень**

Калійні виробництва у Прикарпатті та у зарубіжних країнах негативно впливають на довкілля, а саме: забруднюють атмосферне повітря, відбувається масштабне засолення родючих земель, змінюється гідрохімічний режим поверхневих та ґрунтових вод.

Серед калійних виробництв Калуського промислового району основними джерелами аеротехногенного забруднення є:

- 1) Магнієве виробництво (I клас небезпеки), яке характеризується викидами таких шкідливих речовин: хлор, хлористий водень, оксид вуглецю, діоксид азоту, сірчистий ангідрид, оксид кальцію.
- 2) Солевідвали Домбровського кар'єру (III клас небезпеки) є необмеженим джерелом пилового сольового забруднення внаслідок дії вітрової ерозії.
- 3) Підприємства з транспортування та переробки калійних руд є джерелом пилового забруднення повітряного середовища всередині робочих приміщень, що негативно впливають на здоров'я працюючих.

Геологічне середовище Калуського промислового району є сприятливе відносно аеротехногенного його забруднення, оскільки тут розвинуті алювіальні суглинки, що характеризується високою абсорбційною здатністю щодо пилу та димових газів; ґрунтові води залягають на глибині 2-3 м від поверхні і недостатньо захищені від забруднення перекриваючими ґрунтами; густа гідрологічна сітка сприяє інтенсивному водообміну у водоносних горизонтах і винесення солей збільшується.

Для розробки природоохоронних заходів і засобів та їх реалізації нами сформовані задачі досліджень: провести аналіз сучасного стану проблеми з екологічної безпеки в районах промислових калійних виробництв, розташованих у Прикарпатті та у країнах СНД; створити математичні моделі для прогнозування аеротехногенного забруднення атмосфери, ґрунтів, ґрунтових вод; оцінити вплив аеротехногенного забруднення в польових та лабораторних умовах; розробити та випробувати у виробничих умовах автоматизовану установку для боротьби з пилом при транспортуванні та переробці калійних руд.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА КАЛІЙНИМИ ВИРОБНИЦТВАМИ

#### 2.1. Теоретичні відомості про аеротехногенне забруднення навколишнього середовища

Зростаючий вплив на навколишнє середовище антропогенної діяльності пов'язаний, в першу чергу, з різким збільшенням попадання забруднюючих речовин в атмосферу, поверхневі і підземні води, ґрунт. Найбільш масштабним й значним є попадання в навколишнє середовище великої кількості хімічних сполук, раніше не властивих йому. Серед них - газоподібні та аерозольні забруднювачі. Прогресує і накопичення вуглекислого газу в атмосфері. Подальший розвиток цього процесу буде посилювати небажану тенденцію в сторону підвищення середньорічної температури на планеті [41].

Атмосферний пил і аерозолі можуть мати як природне, так і антропогенне походження. Атмосферний пил і дим антропогенного походження утворюються в результаті промислових викидів. Промислові викиди класифікують за ступенем дисперсності: крупний пил (розмір частинок  $> 10$  мкм), дрібний пил (розмір частинок від 1 до 10 мкм) і дим (розмір частинок  $< 1$  мкм); за станом: зважені частинки у повітрі носять назву аерозоль, а ті, що осіли на поверхню землі – аерогель. При спалюванні палива утворюються пил, сірчистий ангідрид, двоокис вуглецю, пари води, окисли різних елементів (від літію до урану), які навіть після газоочисних споруд потрапляють в атмосферу. Одночасно з'являються тверді відходи у вигляді золи і шлаків, які складують, як правило, на поверхню землі [3].

На більшій частині земної поверхні активність аеротехногенного забруднення обмежується першими двома кілометрами атмосфери. Рівень забруднення повітря залежить не лише від обсягу викидів промислових підприємств і автотранспорту, а й від метеорологічних умов. Жаркі безвітряні літні дні або безвітряна погода восени

та взимку, коли майже немає циркуляції повітря, сприяє утворенню застійних явищ біля поверхні землі й різкому зростанню концентрацій шкідливих домішок, утворенню смогу на вулицях з напруженим автомобільним рухом. Більша частина забруднювачів міститься у відхідних газах, отриманих в результаті спалювання палива, які, будучи набагато теплішими навколишнього повітря, намагаються піднятися уверх, оскільки мають меншу густину, ніж оточуюче холодне повітря. У процесі підйому викиди перемішуються з навколишнім повітрям і стають значно холоднішими, а тому і піднімаються все повільніше. Час перебування частинок в атмосфері, а отже і їх розповсюдження по земній поверхні, залежить як від їх величини і густини, так і від швидкості розповсюдження вітрів, а також від того, на яку висоту частинки були підняті. Крупні частинки звичайно осідають протягом годин або діб, тим не менше вони можуть переноситись на сотні кілометрів, якщо спочатку вони були на достатній висоті.

Ті частинки, які по своїй поведінці схожі до частинок газів (діаметр 1 мкм і менше), у значно меншій мірі підлягають дії атмосферних опадів, час їх перебування в нижніх шарах атмосфери складає 10-20 днів.

Якщо пил і аерозолі досягають верхніх шарів тропосфери, то вони можуть проникнути і у стратосферу за допомогою горизонтальних повітряних потоків між тропосферою і стратосферою.

Атмосферний пил і аерозолі, що накопичуються над містами і промисловими зонами, мають лише регіональне значення. Вони утворюють згущення над первинними джерелами, але при сильному русі повітряних мас ці забруднення можуть розноситись у підвітряну сторону.

Ніяка очистка не в змозі видалити всі забруднювачі із промислових повітряних викидів. Яка-небудь доля матеріалу, забруднюючого викид (10%, 1% або навіть 0,1%), залишається у відхідних газах, і навіть ця невелика доля може складати суттєво велику кількість.

В ідеальному випадку контамінанти повинні випускатися в атмосферу з концентраціями, які можуть розглядатися як зовсім нешкідливі. Часто це здійснюється шляхом розсіювання з допомогою високих труб, які виводять

контамінанти в атмосферу на висоті, що забезпечує розбавлення до контакту з поверхнею землі.

Основною причиною розсіювання шкідливих речовин в атмосфері є турбулентна дифузія та гравітаційна седиментація.

Дослідження проблем атмосферної дифузії має тривалу історію, однак його результати застосовуються до питань забруднення атмосфери порівняно недавно.

В 20-30 роках ХХ століття виробилось уявлення про те, що у багатьох випадках перенос тепла і вологи в приземному шарі атмосфери можна наближено розглядати як розповсюдження пасивної домішки та досліджувати ці процеси на основі одних і тих же диференціальних рівнянь.

Зв'язок між результатами досліджень атмосферної дифузії домішок та закономірностями тепло- і вологообміну в приземному шарі повітря безпосередньо проявляється і при розв'язку відповідних задач. Так, отримані при розв'язуванні диференціальних рівнянь тепло- і вологообміну функції Гріна являють собою функції розподілу домішок, які розповсюджуються в атмосфері від джерела при певних крайових умовах.

Важливе значення мало встановлення виду рівнянь, які описують атмосферну дифузію. Для опису процесу атмосферної дифузії використовувались рівняння параболічного виду, що є узагальненням відомого рівняння Фіка.

Вже у перших працях, присвячених проблемам атмосферної дифузії, намітилися два підходи до дослідження розповсюдження домішок в приземному шарі атмосфери. Один підхід, що спирається на роботу А.Роберса, оснований на розв'язуванні рівняння турбулентної дифузії з постійними коефіцієнтами. Інший підхід був розвинутий О.Сеттеном і полягав у використанні формул для визначення концентрації домішок від джерела, отриманих статичним шляхом [42].

У вітчизняних роботах, як правило, розглядаються рівняння турбулентної дифузії із змінними коефіцієнтами. Такий шлях дослідження є універсальним, так як дозволяє розв'язувати задачі з різними джерелами, характеристиками середовища, крайовими умовами. Серед робіт, присвячених питанню турбулентної дифузії у даному напрямку, можна віднести праці Л.І. Седова [43], А.Н. Колмогорова [44],



А.М. Обухова [45], Л.Г. Лойцяньського [46], В.М. Ельтермана [47], В.В. Буяцького [48].

З часом з'явилися нові вимоги до методів дослідження атмосферної дифузії. Виникла необхідність вивчення турбулентних потоків на великих висотах, дослідження питань розсіювання домішок від джерел на великих відстанях, врахування великого числа параметрів. Етапи еволюції методів дослідження відображені в роботах А.М. Самарського [49,50], Н.Л. Бизової [51], М.Є. Берлянда [52].

Турбулентна дифузія, відмічає І.О. Хінце [53], - це неупорядкований рух, що виникає в газоподібних або крапельних рідинах, коли вони обтікають непроникні поверхні або коли сусідні потоки однієї і тієї ж рідини знаходяться поруч або проникають один в інший. Відмічено, що у верхній частині приземного шару спостерігається крупномасштабна турбулентність, що викликана взаємним впливом різного напрямку руху повітря, а в нижній частині – турбулентність порівняно дрібномасштабна, що генерується, в основному, обтіканням вітром будівель та нерівностями поверхні землі.

Отже, щоб зрозуміти хід процесів переносу та дифузії забруднень в атмосфері, створюються математичні моделі, мета використання яких полягає в наступному:

- а) передбачити рівень концентрацій в оточуючому повітрі, який обумовлений існуючими джерелами;
- б) встановити максимально допустиму інтенсивність джерела, яка дозволяє підтримувати безпечний рівень вмісту забруднень в оточуючому повітрі;
- в) оцінити вплив на концентрацію джерел забруднень, які вважатимуться новими, або змінених джерел забруднень.

Наприклад, математичною моделлю для прогнозу переносу та розсіювання забруднень в атмосфері є модель ящика [54]. При створенні цієї моделі вважається, що досліджувану площу можна апроксимувати прямокутником. Атмосфера над цією площею розміщується в гіпотетичний ящик, висота якого над рівнем землі відповідає висоті шару змішування. Сторони ящика або визначаються суттєвими рисами геологічної будови місцевості, такими, як гірські ланцюги, або

розташовуються так, щоб дві його сторони були перпендикулярними до переважаючого напрямку вітрів. В більш досконалих моделях ящик ділиться на велике число менших ящиків, квадратні основи яких розміщують на поверхні землі і висота яких співпадає з висотою шару змішування або з деякою частиною висоти, так що атмосфера представляється у вигляді поставлених одна на одну комірок над кожною квадратною основою, а великий ящик з досліджуваною площею в якості основи ділиться на велике число маленьких комірок як в вертикальному, так і в горизонтальному напрямках.

У найпростішому застосуванні багатоящикової моделі дотримуються наступного порядку:

1. Виконують точний підрахунок джерел забруднень з врахуванням їх інтенсивності та місцезнаходження.

2. Іntenсивності джерел в кожній малій комірці сумуються для визначення наближеного середнього значення концентрації в малій комірці.

3. Для знаходження траєкторії руху та розсіювання забруднень з кожної комірки використовують дані про вітер та оцінки стабільної атмосфери.

4. Результуюча середня концентрація забруднень в будь-якій малій комірці, як функція часу, оцінюється як сума усередненої інтенсивності її власних джерел і викидів, що переносяться вітром від інших малих комірок.

Врахування хімічних реакцій та інших процесів перетворення під час переносу, які діють або як джерела, або як стоки забруднень, являють собою приклад удосконалених деяких математичних моделей, які застосовуються останнім часом [54-65].

Під дією турбулентної дифузії забруднювачі осідають на поверхню землі. Цей процес можна назвати турбулентною седиментацією і математично її можна описати у вигляді:

$$D = K \left( \frac{dC}{dh} \right), \quad (2.1)$$

де  $K$  – коефіцієнт турбулентної дифузії ;

$\frac{dC}{dh}$  - градієнт концентрації (зменшення концентрації речовини у вертикальному напрямку до поверхні землі).

Осіданню частинок в атмосфері (у випадку штилю) протирічить броунівський рух, що прагне рівномірно розподілити частинки у певному об'ємі. Відмітимо, що чим менші частинки, тим сильніше виявляється броунівський рух і дифузія. Внаслідок броунівського руху, з одного боку, діє сила тяжіння, а з другого – встановлюється седиментаційно-дифузійна рівновага, яка характеризується повним рівноважним розподілом частинок за висотою. Цей розподіл описується рівнянням Лапласа-Перрене [66]:

$$\ln \frac{C_1}{C_2} = \frac{mg(h_2 - h_1)(\rho - \rho_0)}{K \cdot T\rho}, \quad (2.2)$$

де  $C_1$  і  $C_2$  – концентрації частинок на висоті  $h_1$  і  $h_2$  ;

$m$  – маса частинки;

$T$  – температура;

$\rho$  і  $\rho_0$  – густина частинок і середовища відповідно;

$K$  – константа Больцмана;

$g$  – прискорення сили тяжіння.

Відмітимо, що зменшення концентрації проявляється у тому випадку, якщо речовина має суттєву швидкість осідання, тобто швидко поглинається ґрунтами. Тоді в результаті седиментації концентрація речовин біля поверхні землі зменшується у порівнянні з верхніми шарами повітря. Це явище звичайно можна спостерігати до висоти декількох метрів. Якщо припустити, що збільшення концентрації шкідливих речовин проходить рівномірно (лінійно), то тоді градієнт концентрації має такий вигляд:

$$\frac{dC}{dh} = \frac{(C_1 - C_2)}{(h_1 - h_2)}. \quad (2.3)$$

За даними [42], при малих розмірах шкідливих частинок механізм седиментації підпорядковується турбулентній дифузії, а при більших розмірах частинок переважає гравітаційна седиментація і якщо діаметр частинок переважає 10 мкм, то гравітація починає відігравати значну роль (рис. 2.1).

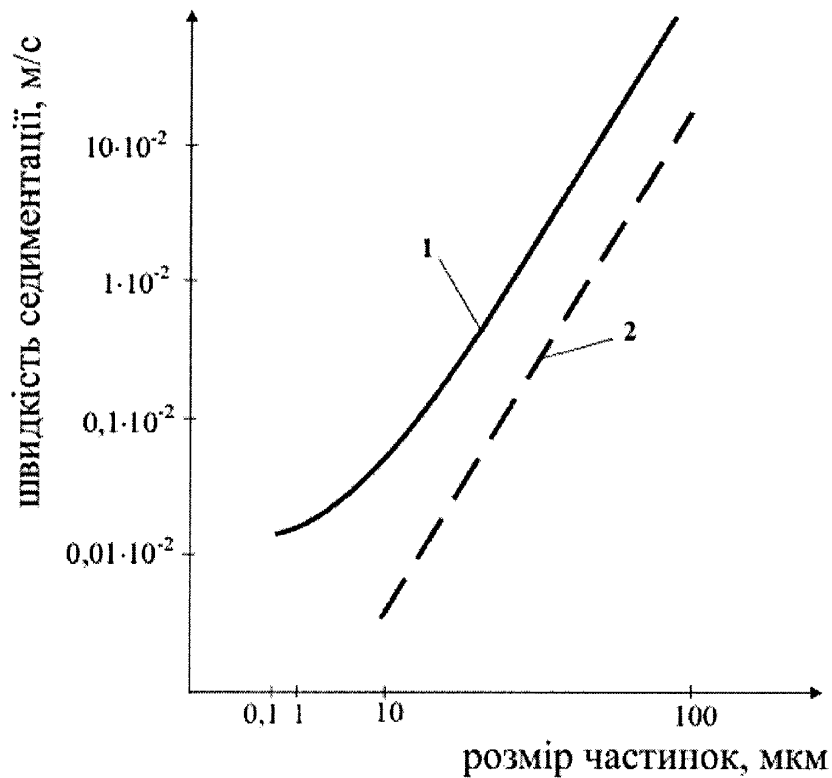


Рис.2.1. Залежність швидкості седиментації шкідливих речовин від їх розміру

1 – аерозольні частинки;

2 – пил.

На сферичну пиловидну частинку з радіусом  $r$  і густиною  $\rho$ , що вільно осідає у дисперсійному повітряному середовищі, густина якого  $\rho_0$  і в'язкість  $\eta$ , діє сила тяжіння  $f$ , яка дорівнює власній вазі частинки:

$$f = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_0) g, \quad (2.4)$$

де  $g$  – прискорення сили тяжіння ;

$r$  - радіус частинки.

Під впливом сили тяжіння пиловидна частинка у повітряному середовищі рухається рівноприскорено. Водночас із силою тяжіння на частинку діє сила опору середовища  $F$ , яка за законом Стокса дорівнює:

$$F = 6 \pi r \eta v, \quad (2.5)$$

де  $v$  - швидкість седиментації;

$\eta$  - в'язкість повітряного середовища.

Відмітимо, що спочатку частинка рухається прискорено, бо при малих швидкостях сила тяжіння перевищує силу тертя. При збільшенні швидкості руху сила тертя зростає і, в деякий момент, урівноважує силу тяжіння, внаслідок чого частинка починає рухатися із сталою швидкістю:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_0) g = 6 \pi r \eta v, \quad (2.6)$$

З рівняння (2.6) знаходимо швидкість гравітаційної седиментації:

$$v = \frac{2g(\rho - \rho_0)r^2}{9\eta}. \quad (2.7)$$

Отже, швидкість сферичної частинки, яка вільно рухається під впливом сили тяжіння, прямо пропорційна квадрату її радіуса і обернено пропорційна в'язкості дисперсійного середовища.

Найбільшу цікавість представляє область розміру частинок у межах від 0,01 до 10 мкм, оскільки до неї відноситься велика частина аерозолів. Чим менший розмір частинок аерозолі, то час перебування її у повітрі відносно великий і, таким чином, ці частинки можуть переноситися на значні відстані.

## 2.2. Дослідження пилового забруднення атмосфери солевідвалами Домбровського кар'єру

У межах Калуш-Голинського родовища калійних солей на земній поверхні складають тверді та рідкі відходи при переробці калійних руд, а також розкривні соленосні породи Домбровського кар'єру, які впливають на довкілля не тільки за рахунок водної ерозії [67-70], але, більш масштабно, впливають шляхом вітрової. Вміст хлористого натрію у розкривних породах досягає 65% (табл. 2.1). Складування порід проводиться у відвали №1 та №4 висотою до 55 м. Загальна площа їх досягає 87 га (табл. 2.2). На даний час у відвали закладовано біля 40 млн.т порід (рис.2.2).

Таблиця 2.1

### Мінеральний склад розкривних порід солевідвалів Домбровського кар'єру

№ п/п	Мінерал	Хімічна формула	Середній процентний вміст
1	Галіт	Na Cl	65
2	Лангбейніт	$K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$	10
3	Полігаліт	$K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$	5
4	Каїніт	$K Cl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$	3
5	Кізерит	$MgSO_4 \cdot H_2O$	0,1
6	Глинисті мінерали	-	16,9

Вітрова ерозія призводить до забруднення довкілля внаслідок виносу частинок із поверхні солевідвалів вітром, причому інтенсивність вітрової ерозії залежить від сили вітру, густини частинок порід, їх гранулометричного складу.

### Солевідвали Домбровського кар'єру

Солевідвали	Площа	Об'єм порід	Висота
№ 1	48 га	12 млн. м <sup>3</sup>	55 м
№ 4	39 га	8 млн. м <sup>3</sup>	30 м



Рис. 2.2. Загальний вигляд солевідвалу №1 Домбровського кар'єру

Проведення гранулометричного аналізу порід солевідвалів №1 та №4, як засолених порід, у водному середовищі затруднено коагуляцією частинок суспензії і її розшаруванням при високій концентрації розчинених солей у водному середовищі - електроліті. А тому, при виконанні гранулометричного аналізу розкривних порід солевідвалів усування коагуляції досягалося відмиванням солей із суспензії дво- або трикратною декантацією та застосуванням стабілізатора суспензії, для чого використовувався пірофосфат натрію (1 см<sup>3</sup> розчину на 1 г наважки породи). Результати аналізу (табл. 2.3) показали, що за гранулометричним складом породи солевідвалів представлені (за класифікацією В.В. Охотіна) в основному глинами. В породах процентний вміст глинистої фракції менше 0,05 мм змінюється від 27,3 до 55,7%. Високий вміст у засолених ґрунтах пиловатих і глинистих

частинок створює умови для інтенсивного розвитку вітрової ерозії солевідвалів.

Таблиця 2.3

**Гранулометричний склад розкривних порід солевідвалів Домбровського кар'єру**

№ проби	Вміст частинок (мм) у сухій наважці, %				
	2,0	2,0-0,5	0,5-0,05	0,05-0,005	менше 0,005
1	2	3	4	5	6
1	1,7	2,7	16,3	41,2	38,1
2	1,8	3,2	21,3	34,0	39,7
3	1,6	4,3	8,9	39,4	45,8
4	2,0	4,4	3,6	52,4	37,6
5	1,2	5,7	16,8	27,3	49,0
6	1,4	5,2	11,5	55,7	46,2
Середній вміст	1,7	4,2	13,1	40,0	42,7

Загальну кількість засолених частинок розкривних порід ( $Q$ , т), винесених вітром з відвалу за певний період, можна оцінити за запропонованою нами формулою:

$$Q = S \cdot \delta \cdot \rho, \quad (2.8)$$

де  $S$  – площа солевідвалу,  $\text{м}^2$ ;

$\delta$  – потужність шару соленосних глин, винесених вітром за певний період, м;

$\rho$  – густина розкривних порід,  $\text{т}/\text{м}^3$ .

Враховуючи зменшення висоти солевідвалів на 0,05 м/рік (за даними інструментальних замірів протягом 1992-2000 р.р.), площу солевідвалів – 494000  $\text{м}^2$  та густину ґрунтів – 2  $\text{т}/\text{м}^3$ , підраховано, що щорічно із солевідвалів за рахунок вітрової ерозії виноситься в атмосферу біля 50 тис. тонн солей.



**2.2.1. Розробка математичної моделі пилового забруднення атмосфери.** Солевідвали Домбровського кар'єру можна розглядати як джерела неорганізованих викидів шкідливих речовин. Дослідження процесів аеротехногенного забруднення довкілля проведене за допомогою математичного моделювання, враховуючи розмір, густину частинок, що розсіюються, а також швидкість вітру [71-76].

Отже, під дією сили вітру починається процес розсіювання частинок з подальшим осіданням їх на поверхню землі, при цьому на частинку  $M$  (рис.2.3) діють сили тяжіння та опір повітряного середовища.

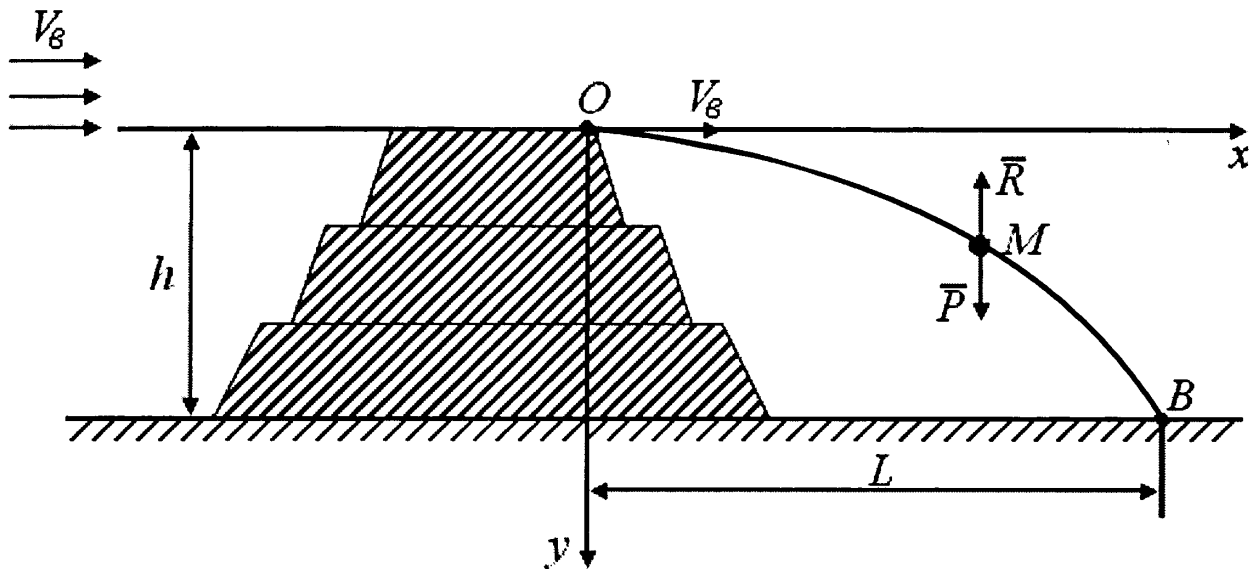


Рис. 2.3. Траєкторія польоту частинок

Частинку приймаємо за матеріальну точку у формі кульки. Рух точки – складний, тому розглянемо рух точки окремо у вертикальному і горизонтальному напрямках. Виберемо точку  $O$  за початок координат. Вісь  $x$  спрямуємо горизонтально вправо, а вісь  $y$  – вертикально вниз.

Диференціальне рівняння руху в проекції на вісь  $y$  (згідно із II законом Ньютона):

$$m \frac{dV}{dt} = P - R,$$

де  $P$  – вага матеріальної точки з густиною  $\rho$ ;

$m$  – її маса;

$R$  – вертикальна складова аеродинамічної сили опору повітря.

Далі приймаємо [77], що:

$$R = 0.5C_m\sigma\rho_nV^2, \quad (2.9)$$

де  $C_m$  – безрозмірний коефіцієнт опору тиску, який залежить від форми частинки, що обтікається, і числа Рейнольда;

$\sigma$  – площа міделєвого перерізу, тобто площа проекції частинки на площину, перпендикулярну до напрямку її руху;

$\rho_n$  – густина повітря;

$V$  – швидкість руху частинки.

При цьому  $R$  має розмірність Н,  $\sigma$  – м<sup>2</sup>,  $\rho_n$  – кг/м<sup>3</sup>,  $V$  – м/с.

Таким чином, диференціальне рівняння переписеться у вигляді:

$$m\frac{dV}{dt} = P - 0.5C_m\sigma\rho_nV^2. \quad (2.10)$$

Позначимо:  $\frac{P}{0.5C_m\sigma\rho_n} = c^2$ , тоді (2.10) набуде вигляду:

$$m\frac{dV}{dt} = P - \frac{PV^2}{c^2} \quad \text{або} \quad \frac{dV}{dt} = \frac{g}{c^2}(c^2 - V^2).$$

Розділивши змінні, отримаємо:  $\frac{g}{c^2} dt = \frac{dV}{c^2 - V^2}$ .

Після інтегрування матимемо:

$$\frac{gt}{c^2} = \frac{1}{2c} \ln \left| \frac{c+V}{c-V} \right| + A. \quad (2.11)$$

Тут  $A$  – довільна стала інтегрування, яку знайдемо із початкової умови:  $t=0$ ,  $V=0$ , звідси  $A=0$ . Тепер (2.11) можна переписати так:

$$\frac{gt}{c^2} = \frac{1}{2c} \ln \left| \frac{c+V}{c-V} \right|.$$

Звідси дістанемо  $V$ :  $V = c \cdot th \left( \frac{gt}{c} \right)$ .

З другого боку  $V = \frac{dy}{dt}$ , отже:  $\frac{dy}{dt} = c \cdot th \left( \frac{gt}{c} \right)$ .

Після інтегрування отримаємо:  $y = \frac{c^2}{g} \ln ch \left( \frac{gt}{c} \right) + B$ .

Тут  $B$  – довільна стала інтегрування, яку знайдемо із початкової умови:  $t=0$ ,  $y=0$ , звідси  $B=0$  і

$$y = \frac{c^2}{g} \ln ch \left( \frac{gt}{c} \right). \quad (2.12)$$

Тоді закон руху точки запишеться у вигляді:

$$\begin{cases} x = V_0 t \\ y = \frac{c^2}{g} \ln ch \left( \frac{gt}{c} \right) \end{cases}$$

Час падіння  $t$  з висоти  $h$  можна знайти з рівняння  $h = \frac{c^2}{g} \ln \operatorname{ch} \left( \frac{gt}{c} \right)$ . Але час падіння можна знайти легше, використовуючи асимптоту для кривої (2.12), яка має вигляд:

$$y = ct - \frac{c^2}{g} \ln 2.$$

Доведемо це. Будемо шукати асимптоту у вигляді  $y = kt + b$ , де:

$$k = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{y}{t} = \frac{c^2}{g} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\ln \operatorname{ch} \frac{gt}{c}}{t} = \frac{c^2}{g} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\operatorname{sh} \frac{gt}{c}}{\operatorname{ch} \frac{gt}{c}} \cdot \frac{g}{c} = c,$$

$$b = \lim_{t \rightarrow \infty} (y - kt) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{c^2}{g} \ln \operatorname{ch} \frac{gt}{c} - ct \right) = \frac{c^2}{g} \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \ln \operatorname{ch} \frac{gt}{c} - \ln e^{\frac{gt}{c}} \right) =$$

$$\frac{c^2}{g} \lim_{t \rightarrow \infty} \ln \frac{\operatorname{ch} \frac{gt}{c}}{e^{\frac{gt}{c}}} = \frac{c^2}{g} \lim_{t \rightarrow \infty} \ln \frac{e^{\frac{gt}{c}} + e^{-\frac{gt}{c}}}{2e^{\frac{gt}{c}}} = \frac{c^2}{g} \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{2} + \frac{e^{-\frac{2gt}{c}}}{2} \right) = \frac{c^2}{g} \ln \frac{1}{2} = -\frac{c^2}{g} \ln 2$$

Отже, асимптота  $y = ct - \frac{c^2}{g} \ln 2$ . Тоді прийнявши, що  $y = h$ , знайдемо час  $t$ :

$$t = \frac{h}{c} + \frac{c}{g} \ln 2.$$

Тепер визначимо дальність польоту:

$$L = V_e t \quad \text{або} \quad L = V_e \left( \frac{h}{c} + \frac{c}{g} \ln 2 \right).$$

Тут 
$$c = \sqrt{\frac{2P}{C_m \sigma \rho_n}} = \sqrt{\frac{4\rho g d}{3\rho_n C_m}},$$

де  $d$  – діаметр частинки, має розмірність – м;

$g = 9.81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.

Відмітимо, що швидкість  $V$  наближається до свого граничного значення  $V_{сп} = c$  асимптотично. При  $V = c$ , ліва частина рівняння (2.10) дорівнює нулю, тобто  $\frac{dV}{dt} = 0$ . Це означає, що частинка рухається в повітрі рівномірно зі швидкістю витання  $V_{вит} = c$  [77].

Приклад 1. Визначити дальність польоту частинки  $d = 5 \cdot 10^{-5}$  м, при  $t = 20^\circ \text{C}$ , якщо густина частинки  $\rho = 2.2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , висота солевідвалу  $h = 50$  м, швидкість вітру  $V_g = 5 \text{ м/с}$ .

У першому наближенні беремо коефіцієнт опору тиску  $C_m = 10$ , що відповідає числу Рейнольдса для кулі  $R_e = 5$ .

$$V_{вит} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2.2 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 1.2 \cdot 10}} = 0.346 \text{ м/с.}$$

Уточнюємо число Рейнольдса: 
$$R_e = \frac{V_{вит} \cdot d}{\nu} = \frac{0.346 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{0.151 \cdot 10^{-4}} = 1.15,$$

тут  $\nu = 0.151 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  – кінематична в'язкість повітря.

За графіком [77]  $C_m \approx 25$ , тоді у другому наближенні

$$V_{вит} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2.2 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 1.2 \cdot 25}} = 0.219 \text{ м/с.}$$

Уточнюємо число Рейнольдса:  $R_e = \frac{0.219 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{0.151 \cdot 10^{-4}} = 0.725$ .

При числах  $R_e \leq 1$ , коефіцієнт опору тиску визначається за теоретичною формулою Стокса [77]  $C_m = 24 / R_e$ . Тоді

$$V_{\text{вип}} = \frac{\rho g d^2}{18 \nu \rho_n} = \frac{2.2 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \cdot 25 \cdot 10^{-10}}{18 \cdot 0.151 \cdot 10^{-4} \cdot 1.2} = 0.165 \text{ м/с.}$$

$$t = \frac{50}{0.165} + \frac{0.165}{9.81} \ln 2 = 303 \text{ с.}$$

$$L = 5 \cdot 303 = 1515 \text{ м.}$$

Приклад 2. Визначити дальність польоту частинки діаметром  $d = 10^{-4}$  м. Решта даних взяти з прикладу 1.

У першому наближенні приймаємо  $C_m = 10$ , що відповідає числу Рейнольдса для кулі  $R_e = 5$ .

$$V_{\text{вип}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2.2 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 1.2 \cdot 10}} = 0.49 \text{ м/с.}$$

Уточнюємо число Рейнольдса:  $R_e = \frac{V_{\text{вип}} \cdot d}{\nu} = \frac{0.49 \cdot 10^{-4}}{0.151 \cdot 10^{-4}} = 3.24$ .

За графіком [77]  $C_m = 12$ , тоді у другому наближенні

$$V_{\text{вип}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2.2 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 1.2 \cdot 12}} = 0.45 \text{ м/с.}$$

Приймаємо  $V_{вирт} = 0.45$  м/с;  $t = 111.2$  с;  $L = 556$  м.

Результати розрахунків, враховуючи густину, розмір частинок та силу вітру приведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

**Дальність пилового розсіювання солевідвалу №1**

$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	d (м)	$V_{в}$ (м/с)	L (м)
1	2	3	4
$2.2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-5}$	2	606
$2.2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-5}$	5	1515
$2.2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-5}$	8	2424
$1.95 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-5}$	2	682.1
$1.95 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-5}$	5	1705.3
$1.95 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-5}$	8	2728.5
$2.2 \cdot 10^3$	$10^{-4}$	2	224.4
$2.2 \cdot 10^3$	$10^{-4}$	5	561
$2.2 \cdot 10^3$	$10^{-4}$	8	897.6
$1.95 \cdot 10^3$	$10^{-4}$	2	257.6
$1.95 \cdot 10^3$	$10^{-4}$	5	644
$1.95 \cdot 10^3$	$10^{-4}$	8	1030.4
$2.2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-3}$	2	9.8
$2.2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-3}$	5	24.5
$2.2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-3}$	8	39.2
$1.95 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-3}$	2	10.4
$1.95 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-3}$	5	26
$1.95 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-3}$	8	41.6
$2.2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$	2	6.4
$2.2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$	5	16.1

Продовження таблиці 2.4			
1	2	3	4
$2.2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$	8	25.8
$1.95 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$	2	7
$1.95 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$	5	17.6
$1.95 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$	8	28.2

На основі отриманих результатів побудовані графічні залежності дальності польоту частинок від їх густини, розміру та швидкості вітру (рис. 2.4-2.6).

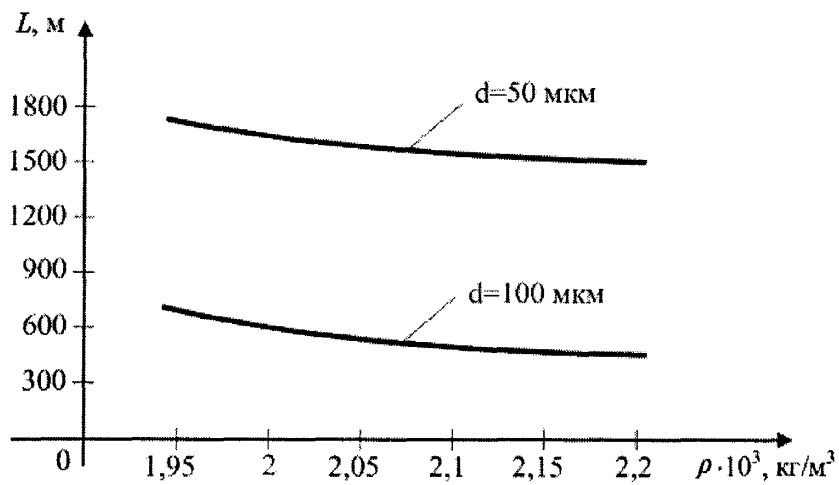


Рис. 2.4. Залежність  $L=L(\rho)$  при  $V_e = 5 \text{ м/с}$

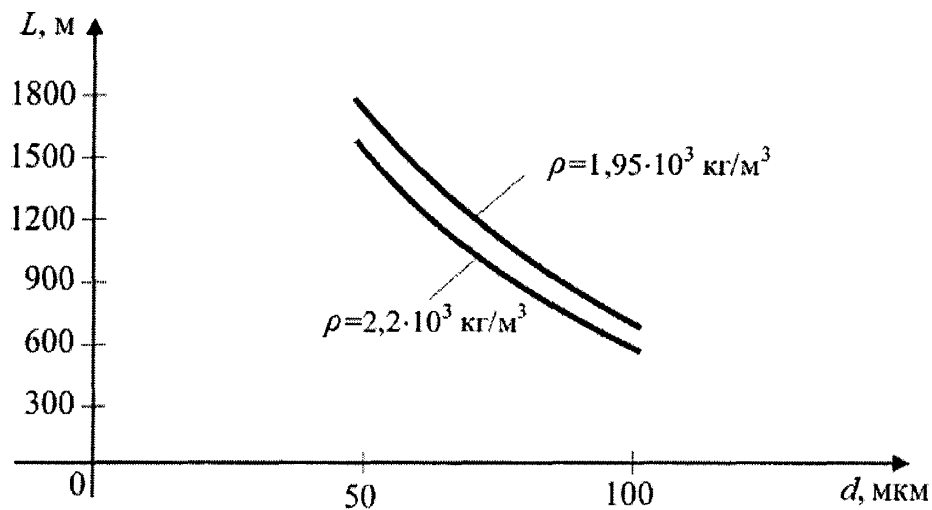


Рис. 2.5. Залежність  $L=L(d)$  при  $V_e = 5 \text{ м/с}$



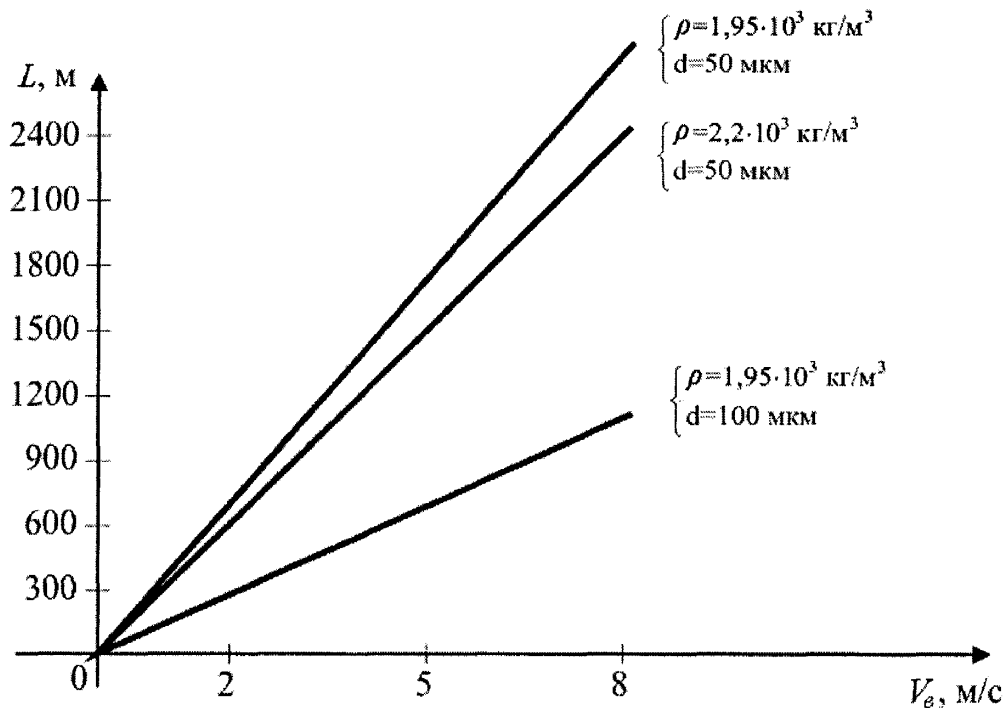


Рис. 2.6. Залежність  $L=L(V_e)$

### 2.3. Моделювання розсіювання аерозолів шкідливих речовин в атмосфері

Охорона повітряного басейну є однією із найважливіших задач проблеми навколишнього середовища, оскільки величезна кількість шкідливих газів, пари, аерозолей, що виділяються різними промисловими об'єктами, внаслідок своєї токсичності є реальною загрозою не тільки для людини, а і для всього тваринного та рослинного світу, для водоймищ та ґрунтів.

Забруднення повітряного басейну, особливо в районах житлових масивів, викликає необхідність розробки ефективних методів контролю за наслідками викидів промислових підприємств в атмосферу. Найбільш небезпечними для людини є викиди підприємств хімічної промисловості.

У даному розділі зроблено спробу змоделювати розсіювання аерозолів в приземному шарі атмосфери, враховуючи динаміку польоту шкідливих речовин з подальшим їх осіданням і розповсюдженням на поверхні землі.

Самі викиди класифікуються на організовані та неорганізовані. Організовані викиди здійснюються через труби, які розраховуються при проектуванні

підприємств. Неорганізовані викиди виникають внаслідок неправильної експлуатації обладнання або при роботі з несправною технікою. Вентиляційні викиди також можна віднести до категорії неорганізованих. Джерела неорганізованих викидів, які, як правило, розміщені на незначних висотах, загазовують територію і забруднювачі повітряними потоками переносяться на житлові масиви. Врахувати ці викиди при проектуванні підприємств неможливо, оскільки вони носять випадковий характер, проте саме вони в значній мірі збільшують забруднення атмосфери. Внаслідок цього виникає необхідність проводити контроль забруднення території підприємства, де, перш за все, розсіюються неорганізовані викиди, а територію підприємства розглядати як локальне джерело забруднення.

**2.3.1. Математична модель розповсюдження аерозолів (димових газів).** Як відомо [66], розповсюдження в атмосфері промислових викидів відбувається за законами турбулентної дифузії. На процес розсіювання викидів впливають такі фактори, як стан атмосфери, розташування підприємств та джерел викидів, характер місцевості, фізичні, хімічні та геометричні властивості речовин, що викидаються, висота джерела, тощо. До фізичних властивостей, в першу чергу, можна віднести густину шкідливих частинок, а до геометричних – їх розмір. Відомим є той факт, що розповсюдження газоподібних домішок і пилових частинок діаметром, меншим ніж 10 мкм, підпорядковуються вказаним закономірностям. Що ж стосується більш великих та важких частинок, то ця закономірність порушується, оскільки під дією сили тяжіння швидкість падіння їх зростає [42].

Саме ця гіпотеза польоту частинок породила ідею побудувати модель, яка би описувала рух цих частинок з врахуванням їх густини та розміру [78,79].

Поставимо таку задачу. На суміш, яка знаходиться в трубі висотою  $h$  діє імпульс  $S$ , під дією якого частинки суміші вилітають вертикально угору з початковою швидкістю  $V_0$  (рис.2.7). Треба визначити дальність польоту  $L$  частинки суміші під дією горизонтального вітру зі швидкістю  $V_0$ .

Частинку приймаємо за матеріальну точку. Рух складний, тому розглянемо рух

точки окремо у вертикальному і горизонтальному напрямках.

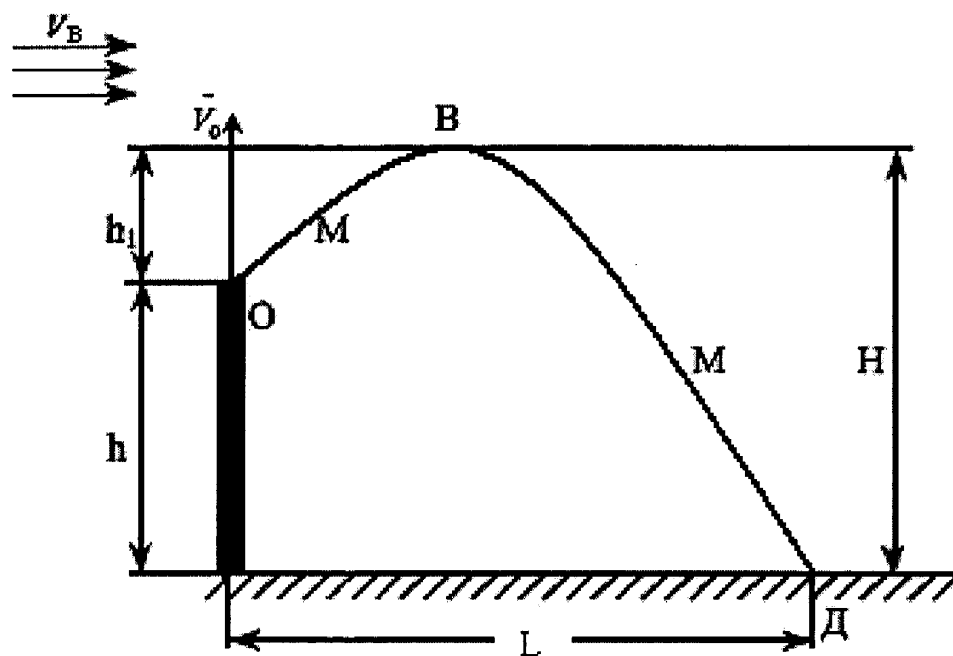


Рис.2.7. Траєкторія польоту частинок

**1 етап.** Розглянемо рух точки  $M$  на ділянці  $OB$  і визначимо найбільшу висоту підйому точки  $h_1$ . Виберемо точку  $O$  за початок координат. Вісь  $x$  направимо горизонтально вправо, а вісь  $y$  вертикально угору (рис.2.8).

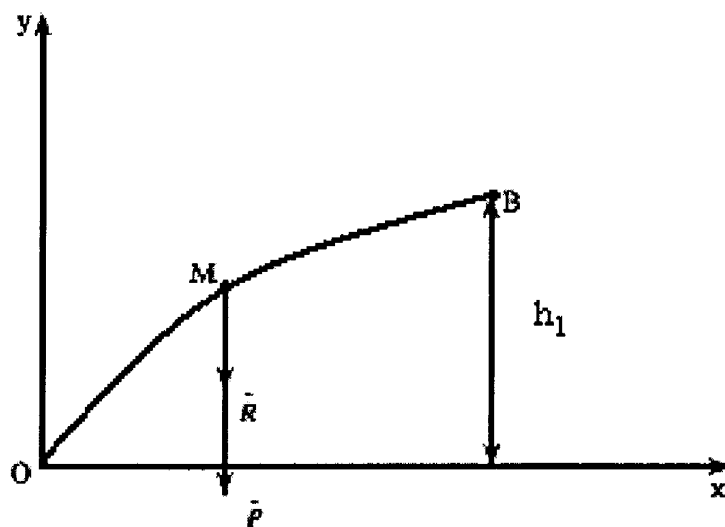


Рис.2.8. Перший етап польоту (рух угору)

Диференціальне рівняння точки в проекції на вісь  $y$ :

$$m \frac{dV}{dt} = -P - R, \quad (2.14)$$

де  $P$  - вага матеріальної точки з густиною  $\rho$ ,  $R$  - вертикальна складова сили опору повітря.

Отже, диференціальне рівняння (2.14) перепишеться у вигляді:

$$m \frac{dV}{dt} = -P - 0.5C_m \sigma \rho_n V^2. \quad (2.15)$$

Позначимо:  $\frac{P}{0.5C_m \sigma \rho_n} = c^2$ , тоді (2.15) прийме вигляд:  $m \frac{dV}{dt} = -P - \frac{PV^2}{c^2}$

$$\text{або } \frac{dV}{dt} = -g \left( 1 + \frac{V^2}{c^2} \right), \text{ або } \frac{dV}{dt} = -\frac{g}{c^2} (c^2 + V^2).$$

Розділивши змінні  $-\frac{gdt}{c^2} = \frac{dV}{c^2 + V^2}$ , проінтегруємо:  $-\frac{gt}{c^2} = \int \frac{dV}{c^2 + V^2}$ ,

$$\text{звідси: } -\frac{gdt}{c^2} = \frac{1}{c} \operatorname{arctg} \frac{V}{c} + C_1,$$

тут  $C_1$  - довільна стала, яка визначається із початкових умов:  $t=0$ ,  $V=V_0$ :

$$C_1 = -\frac{1}{c} \operatorname{arctg} \frac{V_0}{c},$$

отже,  $-\frac{gt}{c^2} = \frac{1}{c} \operatorname{arctg} \frac{V}{c} - \frac{1}{c} \operatorname{arctg} \frac{V_0}{c}$ .

Звідси: 
$$\operatorname{arctg} \frac{V}{c} = -\frac{gt}{c} + \operatorname{arctg} \frac{V_0}{c} \quad (2.16)$$

Час підйому частинки до точки  $B$  (найвищого положення)  $t_1$  знаходимо з умови:  
 $t = t_1, V=0$ , тобто:

$$t_1 = \frac{c}{g} \operatorname{arctg} \frac{V_0}{c}.$$

Позначивши через  $a = \operatorname{arctg} \frac{V_0}{c}$ , перепишемо (2.16):

$$\frac{V}{c} = \operatorname{tg}\left(a - \frac{gt}{c}\right),$$

або 
$$\frac{dy}{dt} = c \cdot \operatorname{tg}\left(a - \frac{gt}{c}\right) \quad (2.17)$$

Проінтегруємо (2.11):  $y = c \int \operatorname{tg}\left(a - \frac{gt}{c}\right) dt = \frac{c^2}{g} \ln \cos\left(a - \frac{gt}{c}\right) + C_2$ .

З початкової умови:  $t = 0, y = 0$  знаходимо:

$$C_2 = -\frac{c^2}{g} \ln \cos a.$$

Отже, закон руху на ділянці  $OB$  такий:

$$\begin{cases} x = V_0 t; \\ y = \frac{c^2}{g} \ln \cos \left( a - \frac{gt}{c} \right) - \frac{c^2}{g} \ln \cos a. \end{cases}$$

За час  $t_1$  точка підніметься над трубою на висоту  $h_1$ :

$$h_1 = \frac{c^2}{g} \ln \cos \left( a - \frac{gt_1}{c} \right) - \frac{c^2}{g} \ln \cos a.$$

Оскільки  $a - \frac{gt_1}{c} = 0$ , то:  $h_1 = -\frac{c^2}{g} \ln \cos a$ ,  $t_1 = \frac{ca}{g}$ .

**2 етап.** Розглянемо рух частинки на ділянці BD. Виберемо точку B за початок координат. Вісь  $x$  направимо горизонтально вправо, а вісь  $y$  вертикально вниз (рис.2.9).

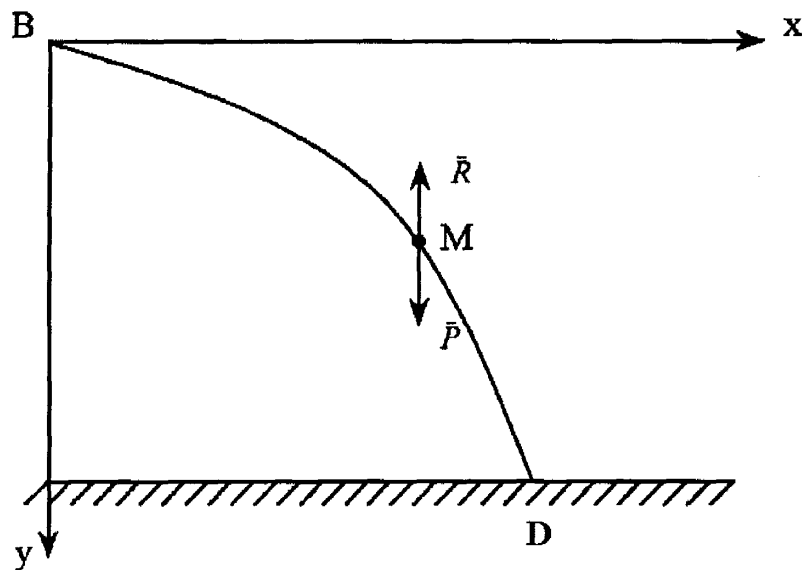


Рис.2.9. Другий етап польоту (рух вниз)

Диференціальне рівняння руху в проекції на вісь  $y$ :

$$m \frac{dV}{dt} = P - R.$$

Використовуючи попередні позначення, одержимо:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{g}{c^2} (c^2 - V^2)$$

або

$$\frac{g dt}{c^2} = \frac{dV}{c^2 - V^2}. \quad (2.18)$$

Проінтегруємо (2.18):  $\frac{g dt}{c^2} = \int \frac{dV}{c^2 - V^2}$ , або  $\frac{gt}{c^2} = \frac{1}{2c} \ln \left| \frac{c+V}{c-V} \right| + C_3$ .

З початкової умови:  $t = 0$ ,  $V = 0$ , визначаємо  $C_3 = 0$ , тоді (2.13):

$$\frac{gt}{c} = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{c+V}{c-V} \right|, \quad (2.19)$$

звідси:  $\frac{c+V}{c-V} = e^{\frac{2gt}{c}}$ .

Отримуємо  $V$ :  $V = c \cdot th \frac{gt}{c}$  або  $\frac{dy}{dt} = c \cdot th \frac{gt}{c}$ .

Інтегруємо:  $y = c \int th \frac{gt}{c} dt$  або  $y = \frac{c^2}{g} \ln ch \frac{gt}{c} + C_4$ .

Довільну сталу  $C_4$  знаходимо із початкової умови:  $t = 0$ ,  $y = 0$ :  $C_4 = 0$ .

Отже,

$$y = \frac{c^2}{g} \ln ch \frac{gt}{c}. \quad (2.20)$$

Час падіння  $t_2$  з висоти  $H = h + h_1$  можна знайти з рівняння:

$$H = \frac{c^2}{g} \ln ch \frac{gt_2}{c}.$$

Але, якщо врахувати, що крива (2.20) має асимптоту

$$y = ct - \frac{c^2}{g} \ln 2, \quad (2.21)$$

то час  $t_2$  можна визначити простіше, замінивши криву (2.20) її асимптотою (2.21):

$$H = t_2 c - \frac{c^2}{g} \ln 2, \text{ звідки } t_2 = \frac{H}{c} + \frac{c}{g} \ln 2.$$

**3 етап.** Ми припустили, що в горизонтальному напрямку частинка рухається рівномірно зі швидкістю вітру  $V_0$ . Отже, за час  $t = t_1 + t_2$ , вона буде віднесена вітром від труби на відстань:

$$L = V_0 t = V_0 (t_1 + t_2), \quad (2.22)$$

Розрахунки за формулою (2.22) проводилися при таких даних:  $h = 120$  (м),  $V_0 = 24.3$  (м/с),  $\sigma = \pi d^2/4$  (м<sup>2</sup>), діаметр частинки  $d \geq 50$  мкм.

В таблиці 2.5 приведені результати розрахунків для різних частинок аерозолів.



## Результати розрахунків

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$d$ , м	$V$ , м/с	$L$ , м
$3.36 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-3}$	2	25.6
$3.36 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-3}$	5	64
$3.36 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-3}$	8	102.4
$1.82 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-3}$	2	31.4
$1.82 \cdot 10^3$	$1.82 \cdot 10^3$	5	78.5
$1.82 \cdot 10^3$	$1.82 \cdot 10^3$	8	125.6
$3.36 \cdot 10^3$	$10^{-4}$	2	402.3
$3.36 \cdot 10^3$	$10^{-4}$	5	1005.8
$3.36 \cdot 10^3$	$10^{-4}$	8	1609.2
$1.82 \cdot 10^3$	$10^{-4}$	2	602
$1.82 \cdot 10^3$	$10^{-4}$	5	1505
$1.82 \cdot 10^3$	$10^{-4}$	8	2408

Розрахунки показали, яким чином дальність пилового розсіювання залежить від висоти труби, швидкості вітру та густини і розміру частинки. При цьому процес сальтації не враховувався. Всі розрахунки виконувались засобами програмного середовища "MathCad".

Отже, на основі проведеного аналізу та гіпотези Белова С.В. [42] розв'язана нестандартна математична задача з розсіювання викидів шкідливих речовин із введенням параметрів густини та діаметру частинок  $d > 10$  мкм. Розроблена методика принципово відрізняється від стандартної ОНД-86, умовою якої є розсіювання твердих часточок за закономірностями турбулентної дифузії згідно I та II законів Фіка [79, 80, 81].

Відмітимо, що в механіці коефіцієнт опору тиску, а значить і коефіцієнт Ейфеля  $K = 0.5C_m\rho_n$ , вважається величиною сталою. Так, для кулі, яка рухається в повітрі

$K = 0.24 \text{ кг/м}^3$  [82]. Слід зауважити, що це правильно для кулі з числом Рейнольдса  $R_e \geq 1000$ . Дійсно, коли  $R_e$  збільшується від 1000 до  $\infty$ , коефіцієнт  $C_m$  дуже повільно зменшується від 0.47 до 0.22 і можна вважати, що  $C_m = \text{const}$ . Так, для частинки з діаметром  $d = 2 \cdot 10^{-3}$  м, густиною  $\rho = 3.36 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $C_m = 0.46$ , а  $K = 0.276 \text{ кг/м}^3$ . При збільшенні діаметру частинки зменшується коефіцієнт Ейфеля, наближаючись до величини  $K = 0.24 \text{ кг/м}^3$ .

Отже, можна зробити висновок:

- 1) Для частинок з діаметром  $d \geq 2 \cdot 10^{-3}$  м, можна вважати, що  $C_m = \text{const}$  і  $K = 0.24 \text{ кг/м}^3$ .
- 2) Для частинок з діаметром  $d < 2 \cdot 10^{-3}$  м коефіцієнт  $C_m$  визначається в залежності від числа Рейнольдса.

**2.3.2. Методика визначення рівня забруднення приземного шару атмосфери.** Дослідження з метою визначення рівня забруднення приземного шару атмосфери, зокрема в Калуському районі, описано в роботах [83-85].

Репрезентативність одержаної інформації, достовірність оперативної оцінки і прогнозу екологічного стану в значній мірі залежить від раціонального вибору місць розташування контрольно-замірних пунктів. Ми поставили перед собою задачу, як при меншій кількості замірів добитися більш повної і правдивої інформації.

Припустимо, що процес розсіювання шкідливих речовин закінчився, тобто став стаціонарним. Частинки осіли, зайнявши певну територію  $\Omega$ . Побудуємо методику дослідження рівня забруднення і прогнозування екологічного стану цієї території.

Як відомо, стаціонарні процеси описуються диференціальними рівняннями еліптичного типу. Тому, математичною моделлю для нашої задачі може служити рівняння Лапласа з крайовими умовами типу Діріхле (задача Діріхле).

Також відомо, що більшість диференціальних рівнянь не мають точного розв'язку, особливо, коли область  $\Omega$  складної форми. У цих випадках широко застосовуються чисельні методи такі, як метод скінчених елементів, скінчених різниць, метод Монте-Карло та їх спрощені схеми [86-96]. До однієї з таких схем

належить спосіб обертання симплекса, який не потребує нанесення сітки на досліджувану область, як в класичних дискретних методах. Він не вимагає спеціальної апаратури, як, наприклад, метод Монте-Карло (для генерування випадкових кодів), досить швидко збігається і в силу своєї простоти може бути реалізований на звичайному мікрокалькуляторі.

Тому саме цей спосіб ми пропонуємо застосувати для розв'язування такої екологічної задачі: треба визначити концентрацію забруднення  $U$  в будь-якій внутрішній точці досліджуваної області  $\Omega$ , обмеженої деякою межею  $\Gamma$ , маючи концентрацію (результати замірів) в ряді крайових точок (рис. 2.10).

Розв'язок задачі Діріхле у внутрішній точці області будемо визначати як зважене усереднення значень на межі області.

Особливість способу обертання симплекса полягає в тому, що будучи безсітковим, він використовує лише один симплекс - елемент, тобто трикутник з вершинами на межі  $\Gamma$ . При цьому передбачена можливість повертати його і розглядати серію "стоп - кадрів". Оскільки при обертанні симплекса вузли змінюються, то відбувається накопичення крайової інформації в досліджуваній точці  $A$  (рис 2.10).

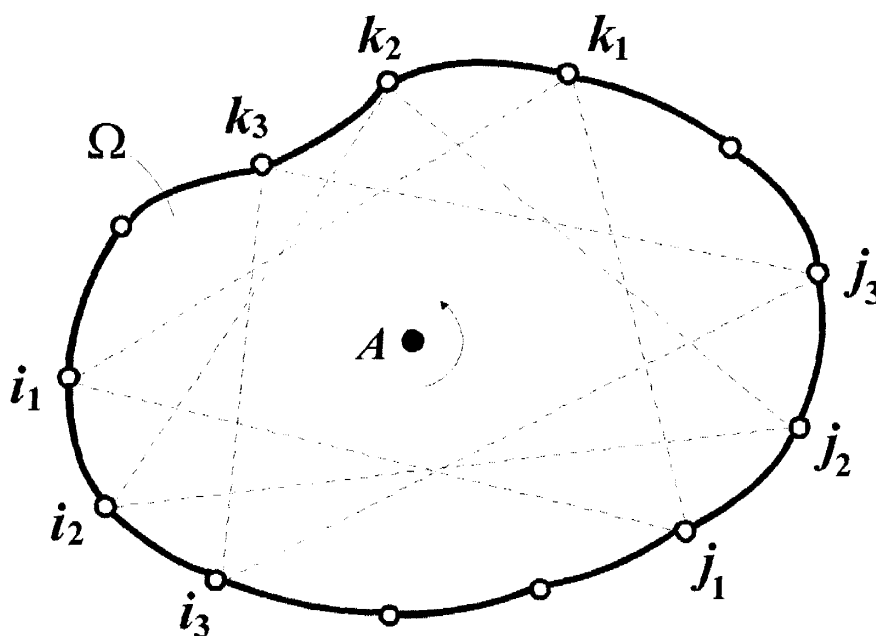


Рис. 2.10. Спосіб обертання симплекса

При цьому значення шуканої величини (яка є розв'язком рівняння Лампаса  $\Delta U = 0$ ) визначається як середнє арифметичне значень, одержаних для кожного положення симплекса  $(i_1, j_1, k_1)$ ,  $(i_2, j_2, k_2)$  і т. д., тобто за формулою:

$$U(A) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N U_n(A) \quad (2.23)$$

де  $N$  - число "стоп - кадрів",

$U_n(A)$  - середнє зважене шуканого розв'язку за трьома крайовими значеннями, яке дорівнює:

$$U_n(A) = U_i \xi_i + U_j \xi_j + U_k \xi_k. \quad (2.24)$$

Тут  $\xi_i, \xi_j, \xi_k$  - вагові коефіцієнти, які визначаються як геометричні ймовірності:

$$\xi_i = \frac{\text{mes} \omega_i}{\text{mes} \omega}, \quad (2.25)$$

де  $\text{mes} \omega$  - площа трикутника з вершинами в точках  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_j, y_j)$ ,  $(x_k, y_k)$ , а  $\text{mes} \omega_i$  - площа трикутника з вершинами в точках  $(x_A, y_A)$ ,  $(x_j, y_j)$ ,  $(x_k, y_k)$  (рис. 2.11).

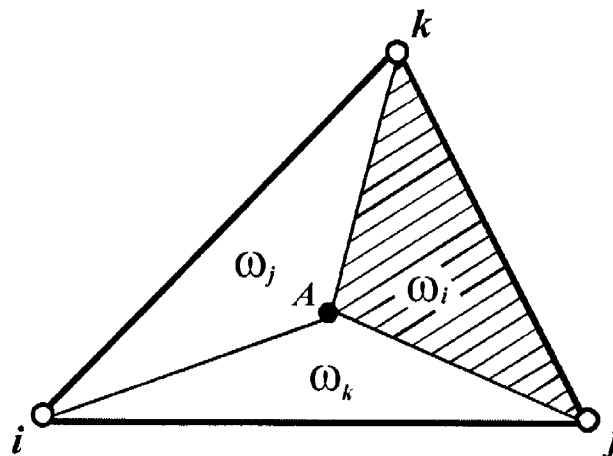


Рис. 2.11. Підобласті симплекс-елемента, відповідні досліджуваній точці  $A$

Аналогічно визначаємо  $\xi_j$  і  $\xi_k$ . Зауважимо, що для способу обертання симплекса не має значення конфігурація області. А ось число вузлів на межі зручно брати кратним трьом. Взагалі число вузлів та їх розташування залежить від бажаної точності та швидкості зміни функції на межі. При необхідності можна зафіксувати один (або два) вузли, змінюючи положення решти.

Отже, запропонована методика для визначення концентрації забруднюючих речовин у будь-якій точці місцевості, виходячи із заміряних концентрацій на прилеглих територіях, доповнює методику, викладену в ОНД-86 [80]. Методика способу обертання симплекса може бути використана для проведення експрес-аналізу рівня забруднення приземного шару атмосфери. Для цього достатньо лише зробити заміри в декількох точках на межі досліджуваної області. Таким чином, дуже просто можна зробити попередній прогноз, що не дозволяє зробити методика [80]. Нашою метою також було привернути увагу спеціалістів-екологів до сучасних дискретних методів, оскільки екологічні процеси описуються досить складними диференціальними рівняннями, які, як правило, точного розв'язку не мають.

Апробацію приведеної методики було здійснено на розрахунках концентрації шкідливих речовин в різних населених пунктах Калуського району [83]. Схема розташування населених пунктів показана на рис. 2.12, при цьому використовувалися відібрані нами із співробітниками науково-дослідного інституту "Галургія" в 1994 р. проби повітря (додаток А).

### **Розрахунок 1**

Розглянемо вибірку замірів концентрації хлору ( $Cl_2$ ) у населених пунктах :

Верхня - 0,058 (мг/м<sup>3</sup>);

Станькова - 0,05 (мг/м<sup>3</sup>);

Копанки - 0,1 (мг/м<sup>3</sup>);

Кропивник - 0,034 (мг/м<sup>3</sup>).

Поставимо задачу про знаходження концентрації хлору в населеному пункті Верхня, знаючи концентрацію в Станьковій, Копанках і Кропивнику. Для розв'язування цієї задачі за способом обертання симплекса виберемо область  $\Omega$  таким чином, щоб населені пункти Станькова, Копанки і Кропивник попали на межу

області, а населений пункт Верхня опинився всередині (рис. 2.13).

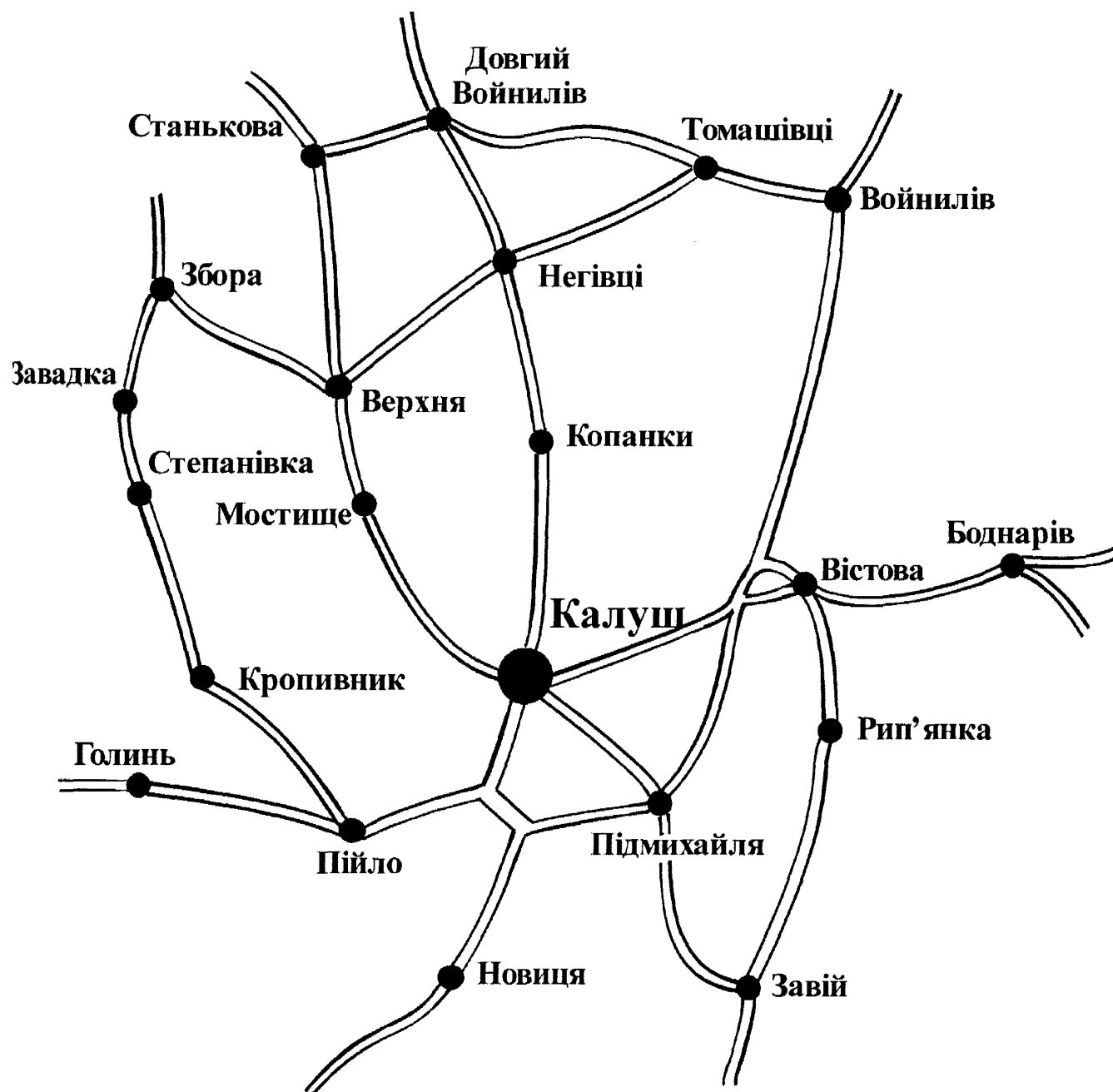


Рис 2.12. Схема населених пунктів Калуського району. Масштаб 1 : 150000

Тоді згідно з формулою (2.24) концентрація  $U$  в населеному пункті Верхня буде

$$U = U_1 \xi_1 + U_2 \xi_2 + U_3 \xi_3,$$

де  $U_1$  - концентрація в населеному пункті Станькова,  $U_2$  - в Копанках,  $U_3$  - в

Кропивнику, які дорівнюють :  $U_1 = 0,05$ ;  $U_2 = 0,1$ ;  $U_3 = 0,034$ ;

$$\xi_1 = \frac{mes\omega_1}{mes(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)};$$

$$\xi_2 = \frac{mes\omega_2}{mes(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)};$$

$$\xi_3 = \frac{mes\omega_3}{mes(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)}.$$

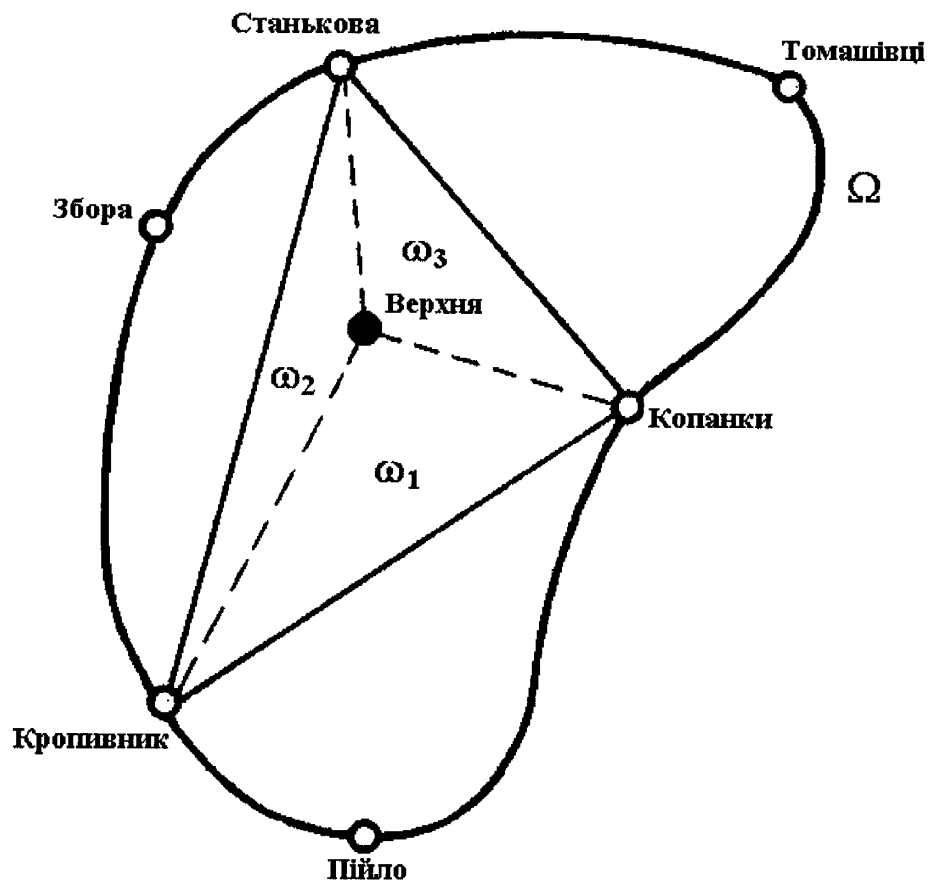


Рис.2.13. Розрахункова схема 1 по визначенню концентрації шкідливих речовин в населеному пункті Верхня

Після обчислення площ відповідних трикутників, отримаємо:

$$\xi_1 = 0,47; \quad \xi_2 = 0,29; \quad \xi_3 = 0,25.$$

Отже,  $U = 0,05 \cdot 0,47 + 0,1 \cdot 0,29 + 0,034 \cdot 0,25 = 0,061$ .

Результат заміру концентрації в населеному пункті Верхня  $U_0 = 0,058$ . Таким чином, відносна похибка обчислення  $\delta$  складає:

$$\delta = \frac{|U - U_0|}{U_0} \cdot 100\% = \frac{0,061 - 0,058}{0,058} \cdot 100\% \approx 0,052 \cdot 100\% = 5,2\%$$

## Розрахунок 2

Розглянемо вибірку замірів концентрації хлору в населених пунктах:

Верхня - 0,0024 (мг/м<sup>3</sup>);

Станькова - 0,0002 (мг/м<sup>3</sup>);

Негівці-0,0001 (мг/м<sup>3</sup>);

Кропивник — 0,0575 (мг/м<sup>3</sup>).

Поставимо задачу про визначення концентрації хлору в населеному пункті Верхня, знаючи концентрацію в Станьковій, Негівцях і Кропивнику. Аналогічно виберемо область  $\Omega$  так, щоб населені пункти Станькова, Негівці та Кропивник знаходилися на межі області, а Верхня - всередині області (рис.2.14).

Визначаємо концентрацію в населеному пункті Верхня за формулою:

$$U = U_1 \xi_1 + U_2 \xi_2 + U_3 \xi_3,$$

де:  $U_1 = 0,0002$ ;  $U_2 = 0,0001$ ;  $U_3 = 0,0575$ ;

$$\xi_1 = \frac{mes \omega_1}{mes(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)} = 0,3;$$

$$\xi_2 = \frac{mes \omega_2}{mes(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)} = 0,37;$$



$$\xi_3 = \frac{mes \omega_3}{mes(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)} = 0,33.$$

Отже,  $U = 0,002 \cdot 0,3 + 0,0001 \cdot 0,37 + 0,0575 \cdot 0,33 \approx 0,0027$ .

Результат заміру концентрації хлору в населеному пункті Верхня  $U_0 = 0,0024$ . Отже, відносна похибка обчислення  $\delta$  складає:

$$\delta = \frac{|U - U_0|}{U_0} \cdot 100\% = \frac{0,0027 - 0,0024}{0,0024} \cdot 100\% \approx 0,125 \cdot 100\% = 12,5\%.$$

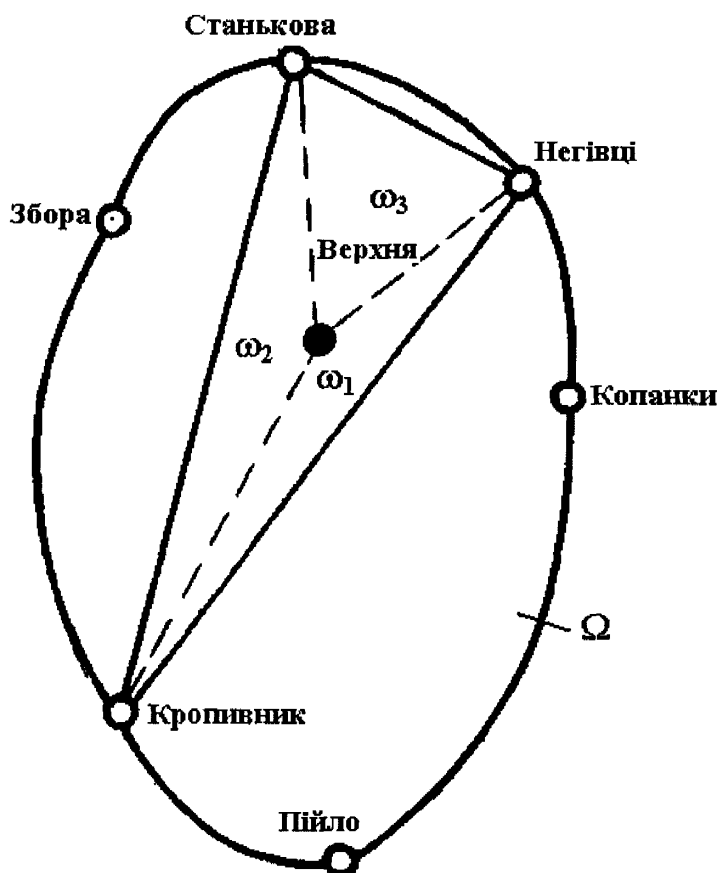


Рис.2.14. Розрахункова схема 2 по визначенню концентрації шкідливих речовин в населеному пункті Верхня

### Розрахунок 3

Розглянемо вибірку замірів концентрації хлору в населених пунктах:

Верхня - 0,0198 (мг/м<sup>3</sup>);

Негівці - 0 (мг/м<sup>3</sup>);

Стефанівка - 0,0529 (мг/м<sup>3</sup>);

Кропивник — 0,05 (мг/м<sup>3</sup>).

Знайдемо концентрацію хлору в населеному пункті Верхня, знаючи концентрацію в Негівцях, Стефанівці, Кропивнику. Виберемо область  $\Omega$  таку, як показано на рис. 2.15.

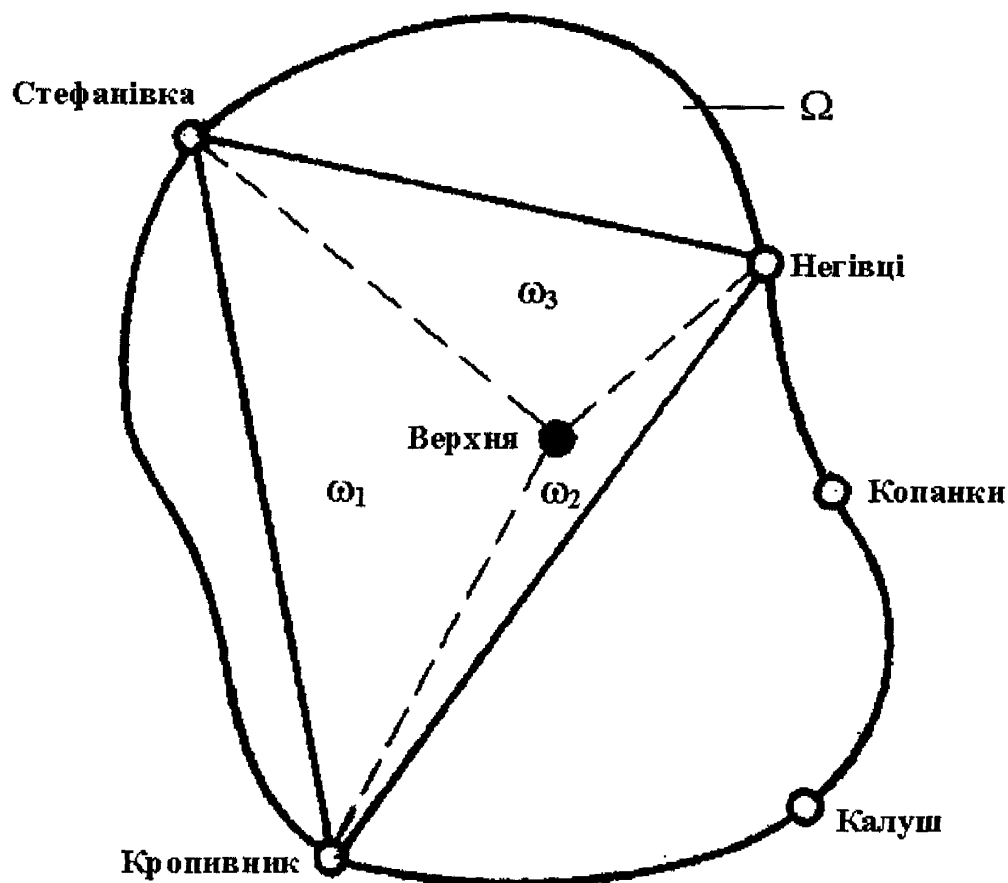


Рис.2.15. Розрахункова схема 3 по визначенню концентрації шкідливих речовин в населеному пункті Верхня

Визначимо концентрацію в населеному пункті Верхня за формулою:

$$U = U_1 \xi_1 + U_2 \xi_2 + U_3 \xi_3,$$

де:  $U_1 = 0$ ;  $U_2 = 0,0529$ ;  $U_3 = 0,05$ ;

$$\xi_1 = \frac{mes\omega_1}{mes(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)} = 0,565;$$

$$\xi_2 = \frac{mes\omega_2}{mes(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)} = 0,107;$$

$$\xi_3 = \frac{mes\omega_3}{mes(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)} = 0,328.$$

Отже,  $U = 0 \cdot 0,565 + 0,0529 \cdot 0,107 + 0,05 \cdot 0,328 \approx 0,02206$ .

Результат заміру концентрації хлору в населеному пункті Верхня  $U_0 = 0,0198$ . Отже, відносна похибка обчислення  $\delta$  складає:

$$\delta = \frac{|U - U_0|}{U_0} \cdot 100\% = \frac{0,02206 - 0,0198}{0,0198} \cdot 100\% \approx 0,114 \cdot 100\% = 11,4\%.$$

Оскільки в цих розрахунках похибка обчислення не перевищує 15%, то ми обмежилися лише одним "стоп-кадром".

Але при обчисленні концентрації шкідливих речовин в деякій внутрішній точці області  $\Omega$  для більшої впевненості, а також, щоб досягнути більшої точності обчислення, слід робити розрахунки для кількох "стоп-кадрів", збираючи інформацію по всій межі області.

Наприклад, розглянемо таку вибірку замірів концентрації хлору в населених пунктах:

Верхня - 0,0198 (мг/м<sup>3</sup>);

Стефанівка - 0,0529 (мг/м<sup>3</sup>);

Копанки - 0,1 (мг/м<sup>3</sup>);

Томашівці - 0 (мг/м<sup>3</sup>);

Негівці - 0 (мг/м<sup>3</sup>);

Мостище - 0,0007 (мг/м<sup>3</sup>).

Виберемо область  $\Omega$ , як на рис. 2.16, і визначимо концентрацію  $U$  в населеному пункті Верхня, знаючи концентрацію в наведених пунктах, які розташовані на межі області.

При цьому вершини трикутника (симплекс-елемента) будуть змінюватися, залишаючись на межі, а сам трикутник буде повертатися навколо населеного пункту Верхня і, збираючи інформацію на межі, передавати її в досліджуваний пункт. Розглянемо перше положення симплекс-елемента з вершинами в пунктах Мостище, Негівці, Стефанівка. Тоді концентрація  $U_I$  в населеному пункті Верхня визначається за наступною формулою:

$$U_I = U_1 \xi_1 + U_2 \xi_2 + U_3 \xi_3,$$

де:  $U_1 = 0,0007$ ;  $U_2 = 0$ ;  $U_3 = 0,0529$ ;  $\xi_1 = 0,6$ ;  $\xi_2 = 0,21$ ;  $\xi_3 = 0,19$ .

Отже,  $U_I = 0,0007 \cdot 0,6 + 0 \cdot 0,21 + 0,0529 \cdot 0,19 = 0,01047$ .

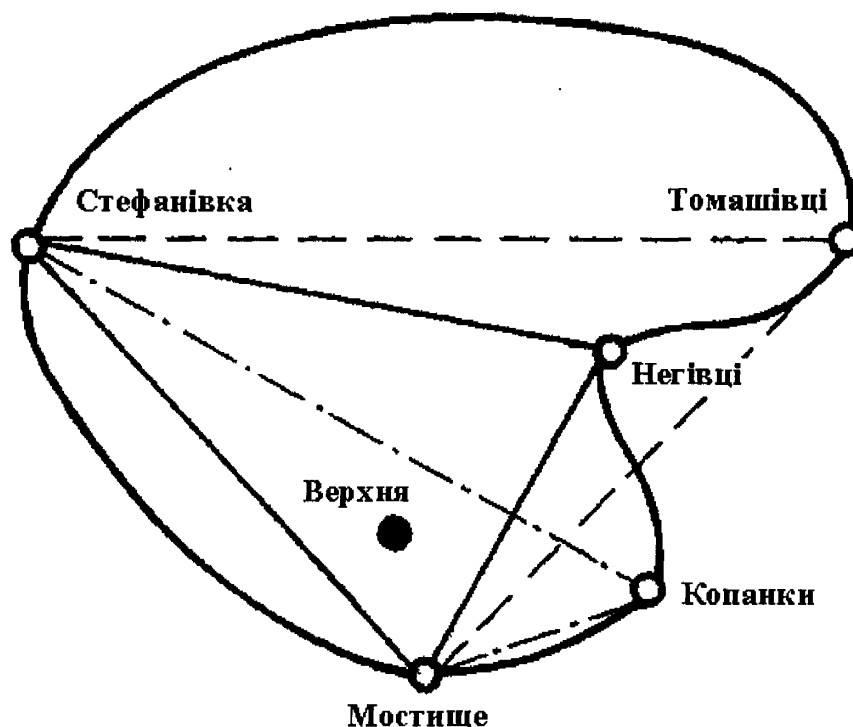


Рис. 2.16. Розрахункова схема з визначення середньої концентрації шкідливих речовин в населеному пункті Верхня

Друге положення симплекс-елемента виберемо з вершинами в пунктах Мостите, Копанки, Стефанівка. Тоді концентрація  $U_{II}$  в населеному пункті Верхня визначається за формулою:

$$U_{II} = U_4 \xi_4 + U_5 \xi_5 + U_6 \xi_6,$$

де  $U_4 = 0,0007$ ;  $U_5 = 0,1$ ;  $U_6 = 0,0529$ ;  $\xi_4 = 0,49$ ;  $\xi_5 = 0,26$ ;  $\xi_6 = 0,25$ .

$$\text{Отже, } U_{II} = 0,0007 \cdot 0,49 + 0,1 \cdot 0,26 + 0,0529 \cdot 0,25 = 0,03957.$$

І третє положення симплекс-елемента виберемо з вершинами в пунктах Мостице, Томашівці, Стефанівка. Тоді концентрація  $U_{III}$  в населеному пункті Верхня визначається за такою формулою:

$$U_{III} = U_7 \xi_7 + U_8 \xi_8 + U_9 \xi_9,$$

де  $U_7 = 0,0007$ ;  $U_8 = 0$ ;  $U_9 = 0,0529$ ;  $\xi_7 = 0,721$ ;  $\xi_8 = 0,119$ ;  $\xi_9 = 0,16$ .

$$\text{Отже, } U_{III} = 0,0007 \cdot 0,721 + 0 \cdot 0,119 + 0,0529 \cdot 0,16 = 0,00897.$$

Тепер згідно з формулою (2.23) знайдемо середнє значення концентрації  $U$ , як середнє арифметичне знайдених концентрацій:

$$U = \frac{1}{3}(U_I + U_{II} + U_{III}) = \frac{1}{3}(0,01047 + 0,03957 + 0,00897) = 0,01967.$$

Знайдемо відносну похибку обчислення, якщо результат заміру в населеному пункті Верхня  $U_0 = 0,0198$ .

$$\text{Отже, } \delta = \frac{|U - U_0|}{U_0} \cdot 100\% = \frac{0,01967 - 0,0198}{0,0198} \cdot 100\% \approx 0,0066 \cdot 100\% = 0,66\%.$$

Як бачимо, результати обчислень для кожного окремого положення симплекс-елемента могли суттєво відрізнитися від результату заміру, але середня величина дає досить близьке значення і похибка виявилася менше 1%. Виходячи з отриманих результатів, можна надати такі рекомендації. При розв'язуванні задачі по визначенню концентрації шкідливих речовин в будь-яких населених пунктах (наприклад  $A_1, A_2, A_3, \dots$ ) за методом обертання симплекса треба визначити умовну область  $\Omega$ , яка б включала в себе пункти  $A_1, A_2, A_3, \dots$ , межа якої проходила б через населені пункти  $B_1, B_2, B_3, \dots$ . В пунктах, що розташовані на межі області  $\Omega$  треба зробити заміри концентрацій шкідливих речовин, після чого виконати відповідні процедури по обчисленню концентрацій в пунктах, що знаходяться всередині області  $\Omega$  ( $A_1, A_2, A_3, \dots$ ) згідно з методикою способу обертання симплекса.

**2.3.3. Моделювання динаміки розповсюдження шкідливих речовин на межі системи “повітря–грунт”.** Шкідливі частинки цілком природньо розглядати випадково блукаючими по області, на яку вони попали в результаті промислових викидів.

В основі одного з найбільш ефективних сучасних варіантів методу Монте-Карло лежить так звана схема блукань по колах, запропонована Брауном і математично обґрунтована К.Маллером [91]. Між цією схемою і механізмом розповсюдження дифузійної плями є прямий зв'язок [97, 98].

Щоб у цьому впевнитися, достатньо зробити такий експеримент: на скло, наприклад, у формі чотирикутника розмістимо краплю чорнила. Відповідно з законом дифузії чорнильні частинки почнуть блукати, переміщуючись від центру плями до меж чотирикутника по концентричних колах (рис 2.17).

Засобами теорії ймовірностей виявлено, що радіус дифузійної плями  $r_{пл}$  зв'язаний з часом  $t$  наступною залежністю, одержаною А.Ейнштейном:

$$r_{пл} = \alpha \sqrt{t} \quad (2.26)$$

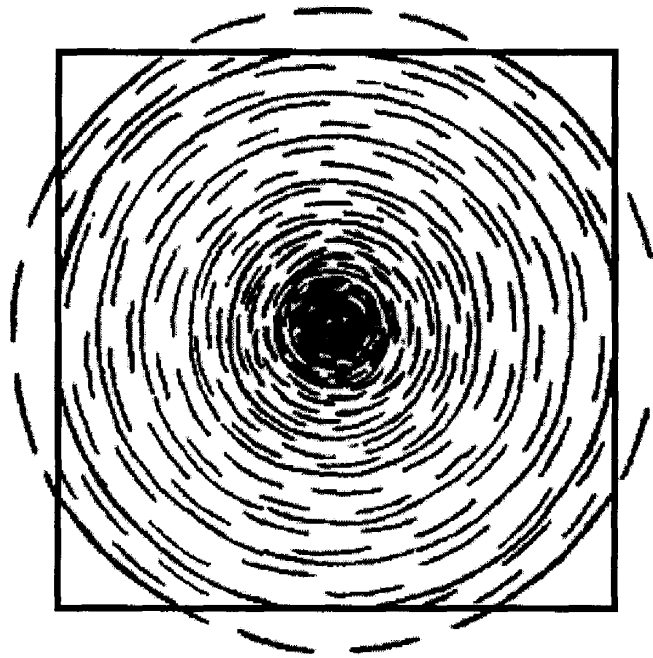


Рис. 2.17. Розповсюдження дифузійної плями

Тобто, за таким законом збільшується радіус концентричних кіл, по яких переміщуються блукаючі частинки. Тут  $\alpha$  - коефіцієнт пропорційності, який залежить від фізико - хімічних властивостей як самих частинок, так і тієї поверхні, по якій вони рухаються. Фактично формула (2.26) вже є законом розповсюдження дифузійної плями.

Розпишемо цей закон у векторній формі по відношенню до прямокутної декартової системи координат і дослідимо переміщення дифузійної плями в залежності від сили вітру. Очевидно, що під дією вітру концентричні кола будуть zdeформовані і витягнуті в напрямку дії вітру. Нехай задано величину швидкості вітру  $V_0$ . Введемо систему координат так, щоб початок координат містився в центрі дифузійної плями (рис. 2.18), а напрям осі  $OX$  співпадав з напрямом дії вітру.

Розпишемо у векторній формі закон руху дифузійної плями (2.26):

$$\bar{r}_{nl} = r_{nl} \cos \varphi \vec{i} + r_{nl} \sin \varphi \vec{j} = \alpha \sqrt{t} (\cos \varphi \vec{i} + \sin \varphi \vec{j}),$$

де  $r_{nl}$  - величина радіус - вектора  $\bar{r}_{nl}$ ;

$\varphi$  - кут, який утворює промінь  $\bar{r}_{nl}$  з додатним напрямом осі  $OX$ , ( $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ).

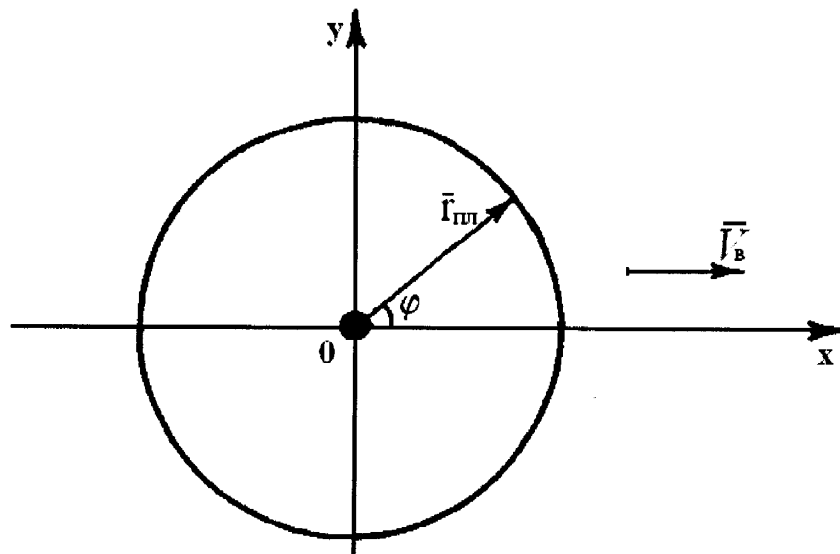


Рис.2.18. Вибір системи координат

Тепер можна визначити вектор швидкості розповсюдження дифузійної плями  $\bar{V}_{nl}$ , як похідну від  $\bar{r}_{nl}$  по часу  $t$ :

$$V_{nl} = \dot{r}_{nl} = \frac{a}{2\sqrt{t}} (\cos \varphi \bar{i} + \sin \varphi \bar{j}).$$

Вектор швидкості вітру має вигляд:

$$\bar{V}_B = V_B \bar{i}.$$

Тоді дифузійна пляма з врахуванням сили вітру буде переміщуватися зі швидкістю:

$$\bar{V}_B = \bar{V}_{nl} + \bar{V}_B = \left( \frac{a \cos \varphi}{2\sqrt{t}} + V_B \right) \bar{i} + \frac{a \sin \varphi}{2\sqrt{t}} \bar{j}.$$

Проінтегрувавши по часу останнє співвідношення, можна одержати закон руху дифузійної плями, тобто шкідливих речовин, з врахуванням сили вітру:

$$\bar{r} = (a\sqrt{t}\cos\varphi + V_B t)\bar{i} + a\sqrt{t}\sin\varphi\bar{j}.$$



Таким чином, якщо задавати значення  $\phi$ , можна побудувати форму дифузійної плями в будь-який момент часу  $t$  і провести чисельний аналіз рівня забруднення досліджуваної території. А повертаючи систему координат навколо початку координат, можна врахувати дію вітру в різних напрямках.

Побудуємо форму дифузійної плями для міста Калуща, враховуючи його кліматичні характеристики.

Враховуючи середньорічну розу вітрів Калуського району (рис. 1.5), відкоректуємо форму дифузійної плями, тобто форму розповсюдження шкідливих речовин (рис 2.19). При цьому джерело викидів знаходиться в центрі.

З цього рисунка видно, що найбільш ймовірними напрямками руху частинок є північно-західний і особливо південно-західний. В цих напрямках протягом року переважає розсіювання шкідливих речовин.

Згідно з цими міркуваннями можна побудувати форму розповсюдження дифузійної плями, яка з часом буде поширюватися у всіх напрямках (рис 2.20).

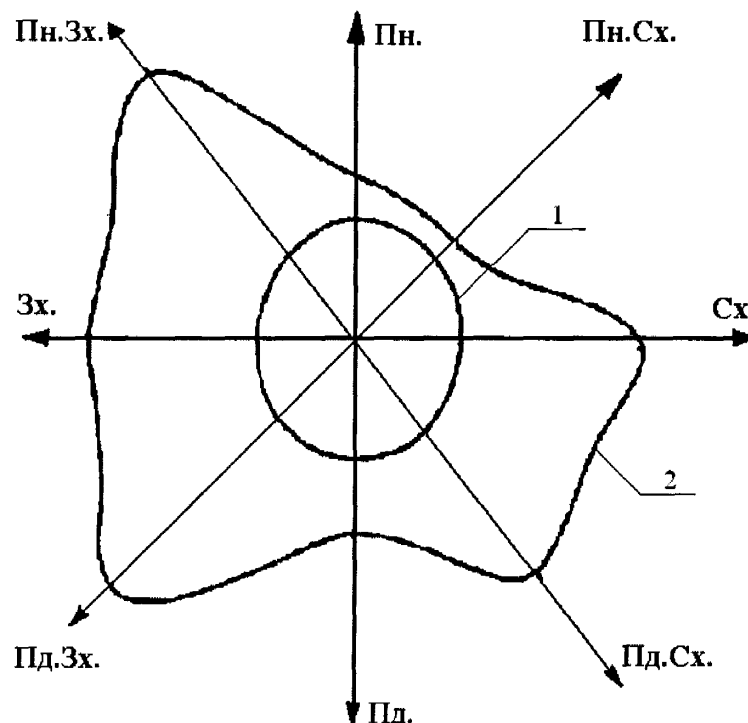


Рис.2.19. Розповсюдження шкідливих речовин

1 – на момент штилю;

2 – з урахуванням середньорічної рози вітрів.

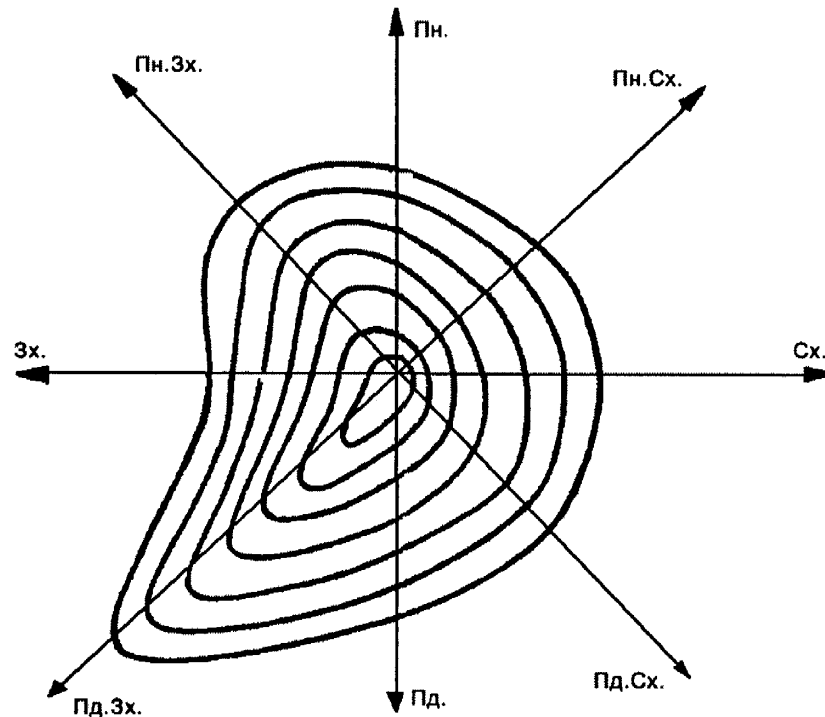


Рис.2.20. Деформація дифузійної плями з часом

Як бачимо, найбільш ймовірно, що шкідливі речовини будуть переміщуватися в напрямі вітру, а саме – південно-західному та північно-західному, які треба визначити пріоритетними при дослідженні даної області на предмет забруднення в результаті викидів промислових підприємств по виробництву калійних добрив та магнію, розташованих на північному заході від міста Калуш.

#### **2.4. Побудова поля ризику від точкового джерела небезпеки при неконтрольованих (аварійних) викидах шкідливих речовин**

У цьому розділі розглядається методика побудови поля ризику, який виникає внаслідок неконтрольованих промислових викидів шкідливих речовин, аналізується дія точкового джерела, а також можливість кількісно оцінити потенційну небезпеку [99-101].

Зростаючі масштаби взаємодії суспільства і природи породили екологічну проблему, пов'язану з погіршенням якості оточуючого людину природного середовища.

Непомірне навантаження на навколишнє середовище за останні роки призвело

до того, що концентрації деяких шкідливих речовин перевищують допустимі значення. Тому необхідно проводити постійний контроль за викидами кожного джерела забруднення і на його основі робити прогноз екологічного стану.

Більш детальне вивчення цієї проблеми призвело до усвідомлення необхідності розглядати не тільки катастрофічні (глобальні) аварії, які трапляються досить рідко, а також аварії меншого масштабу, проте які часто повторюються, і сумарні збитки від яких можуть бути значно вищими за глобальні аварії. Це в свою чергу призвело до необхідності використовувати поняття ймовірності при оцінці реалізації небезпечних ситуацій та їх наслідків. Тобто з'явилася можливість побудувати математичну модель небезпечних випадкових явищ.

Ймовірність аварії разом з можливими наслідками дає уяву про величину ризику. Розрахунок і аналіз ризику є тим методичним інструментом, за допомогою якого потенційна небезпека може бути оцінена кількісно.

Розглянемо джерело, яке на деякому майданчику створює небезпечну ситуацію у вигляді промислових аварійних викидів шкідливих речовин з подальшим осіданням їх на поверхню землі. На момент штилю розповсюдження поллютантів буде відбуватись навколо джерела викиду. Таке джерело можна вважати точковим, для якого ймовірність аварії  $p$  на елементарному майданчику визначається за формулою:

$$p = \lambda \cdot dS, \quad (2.27)$$

де  $\lambda$  - частота викидів шкідливих речовин,  $\left[ \frac{1}{\text{рік} \cdot \text{м}^2} \right]$ ;

$dS$  - елементарна площа,  $[\text{м}^2]$ , яка містить точкове джерело.

Позначимо максимальний радіус покриття території шкідливими речовинами навколо джерела через  $r_0$ , а характерний розмір "охоплення" довільної точки  $A(x,y)$  для найпростішого випадку симетричного поля дії джерела через  $L$ , що визначається за експериментальною формулою [100]:

$$L = L(x, y) = L(\rho) = r_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{r_0^2}}, \quad (2.28)$$

де  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$  - полярна координата точки А (віддаль її від джерела).

Щоб визначити ймовірність потенційної небезпеки в точці  $A(x, y)$ , проінтегруємо ймовірність (2.27) по області  $D$ , яка є колом з центром в початку координат, де міститься джерело, і радіусом  $L$ :

$$P(A) = \iint_D \lambda dx dy = \lambda \iint_{D'} \rho d\rho d\varphi = \lambda \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^L \rho d\rho = \lambda \pi L^2,$$

де  $\varphi$  - друга полярна координата.

Враховуючи (2.28), одержимо:

$$P(A) = P(x, y) = \lambda \pi r_0^2 \left( 1 - \frac{\rho^2}{r_0^2} \right) = \lambda \pi r_0^2 \left( 1 - \frac{x^2 + y^2}{r_0^2} \right). \quad (2.29)$$

Як бачимо, ймовірність потенційної небезпеки розподілена за законом колового параболоїда (рис.2.21).

Оскільки в області дії джерела може розглядатися скінчене число  $K$  комбінацій метеопараметрів, кожній з яких відповідає своя зона потенційної небезпеки зі своїми характерними розмірами, то сумарну ймовірність появи небезпеки в точці  $A$  можна знайти як суму ймовірностей  $P_k(A)$ :

$$P_{\Sigma}(A) = \sum_1^K P_k(A) = \sum_1^K \lambda q_k \pi r_k^2 \left( 1 - \frac{\rho^2}{r_k^2} \right),$$

де  $q_k$  - ймовірність реалізації  $k$ -го виду метеопараметрів,  $\left[ \frac{1}{\text{рік}} \right]$ ;

$r_k$  – максимальний радіус розповсюдження шкідливих речовин (зони небезпеки)  $k$ -ого виду метеопараметрів, [м].

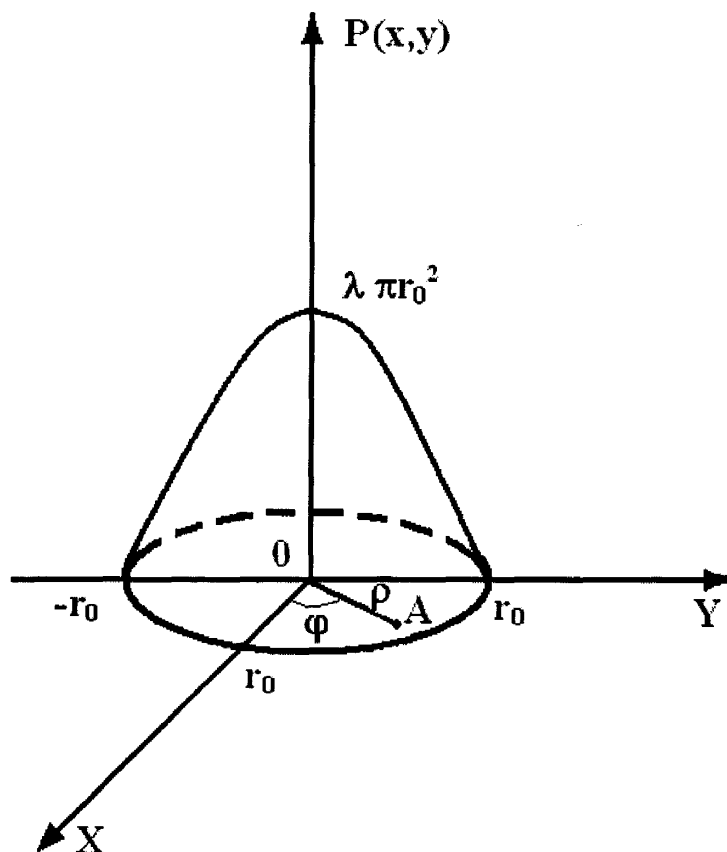


Рис. 2.21. Параболоїд ймовірностей "охоплення"

На рис. 2.22 показано графік сумарної ймовірності  $P_{\Sigma}(x, y)$ , отриманий в результаті накладання параболоїдів ймовірностей потенційної небезпеки для різних комбінацій метеопараметрів.

Щоб одержати поле ризику  $R(x, y)$ , необхідно помножити поле потенційної небезпеки (характеристика наслідків при аваріях) на частоту появи небезпечної ситуації.

Зазначимо, що представлення небезпеки у вигляді поля ризику може врахувати не лише сценарій і специфіку аварійних процесів, а і вплив всієї сукупності природньо-кліматичних факторів регіону. Відзначимо, що такі поля від точкових джерел є необхідними первинними елементами, з яких в подальшому можна сконструювати сумарне поле ризику для досліджуваної території.

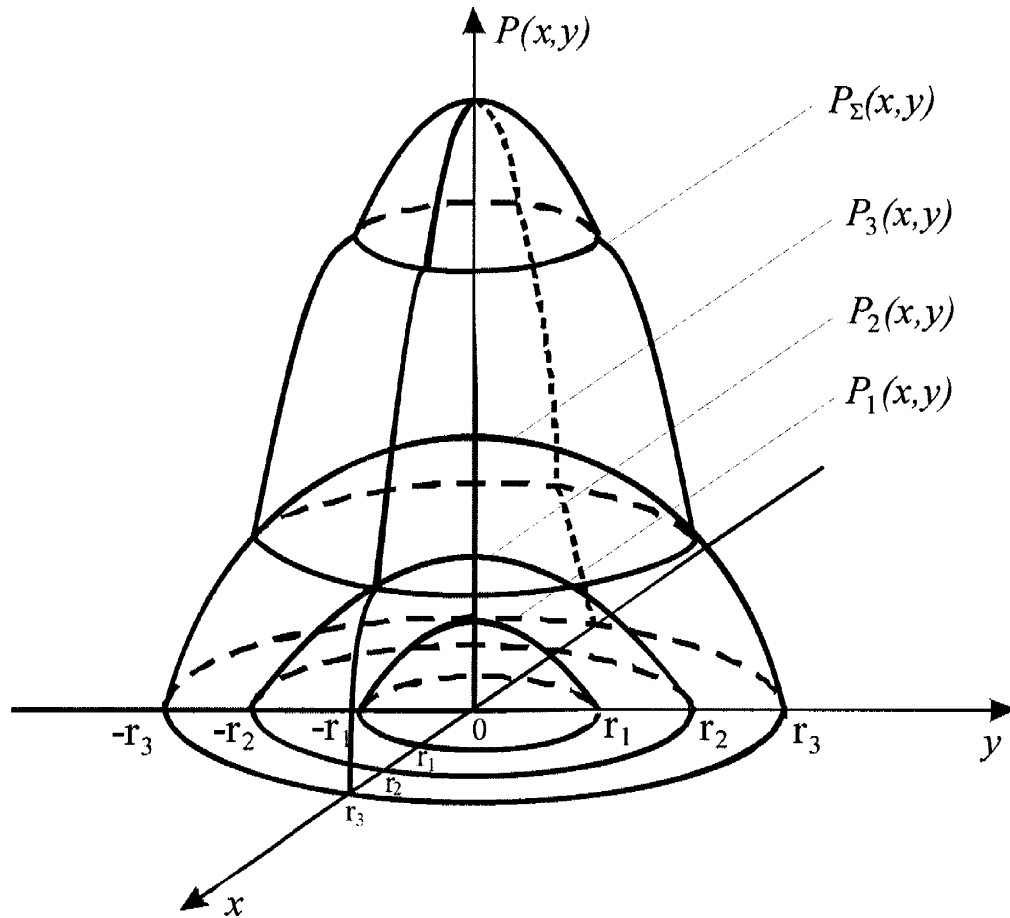


Рис. 2.22. Поверхня розподілу ймовірностей потенційної небезпеки

Зауважимо, що формула (2.29) була отримана за допомогою експериментальної формули (2.28). Зараз спробуємо іншим способом підтвердити параболічний характер розподілу потенційної небезпеки, обумовленої дією точкового джерела.

З цією метою розглянемо задачу про дослідження поля концентрацій забруднюючих речовин деякої області  $\Omega$ , обмеженої контуром  $\Gamma$ , при наявності точкового джерела викидів. Математичною моделлю для такої задачі може служити задача Діріхле для рівняння Пуассона:

$$\Delta U = q$$

з однорідними крайовими умовами:

$$U|_{\Gamma} = 0,$$

де  $U$  - шукана функція концентрації шкідливих речовин,

$\Gamma$  - межа досліджуваної області  $\Omega$ ,

$q$  - функція, яка залежить від просторових координат (може бути і константою) і характеризує інтенсивність джерела.

Як ми вже знаємо, якщо область  $\Omega$  має складну конфігурацію, то ця задача розв'язується наближено за допомогою одного з дискретних методів або їх спрощених схем. Ми застосуємо спосіб обертання симплекса, який дуже ефективно працює при розв'язуванні задачі Діріхле для рівняння Лапласа, розглянуту в розділі 2.3.2 і до якої наша задача зводиться, якщо зробити заміну:

$$V = U - \frac{1}{4}q(x^2 + y^2). \quad (2.30)$$

В результаті отримуємо задачу відносно нової функції  $V$ :

$$\Delta V = 0 \quad (2.31)$$

з крайовими умовами:

$$V|_{\Gamma} = -\frac{1}{4}q(x^2 + y^2). \quad (2.32)$$

Заміна (2.30) фактично дозволяє неоднорідність із рівняння перенести в крайові умови (перевіряється безпосередньо).

Далі задача (2.31), (2.32) розв'язується способом обертання симплекса, який згідно з методикою розділу 2.3.2 дає можливість знайти концентрацію забруднювачів в будь-якій точці  $A$  досліджуваної області  $\Omega$ , як середнє арифметичне зважених усереднень крайових значень:

$$V(A) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n(A), \quad (2.33)$$

де  $N$  - число положень симплекс - елемента,

$V_n(A)$  - середнє зважене трьох крайових значень для кожного окремого положення симплекса.

$$V_n(A) = V_i \xi_i + V_j \xi_j + V_k \xi_k. \quad (2.34)$$

Тут  $V_i, V_j, V_k$  - значення функції  $V$  у вершинах симплекса,  $\xi_i, \xi_j, \xi_k$  - вагові коефіцієнти, які обчислюються за відповідною формулою (2.25).

Визначивши, таким чином, значення  $V(A)$  за формулою (2.33), знаходимо шукану концентрацію:

$$U(A) = V(A) + \frac{1}{4} q (x_A^2 + y_A^2), \quad (2.35)$$

тут  $x_A, y_A$  - координати точки  $A$  в прямокутній системі координат.

При цьому джерело розміщено у початку координат.

Ця методика дозволяє оперативно виконати аналіз рівня забруднення території і дати оцінку екологічного стану.

Проаналізуємо геометричний зміст функції концентрацій  $U$ . Логічно припустити, що найбільші концентрації шкідливих речовин будуть поблизу з джерелом викидів. Попробуємо уточнити форму поверхні  $U(x,y)$ , використовуючи гіпотезу дифузійної плями. Як впливає з розділу 2.3.3, радіус дифузійної плями визначається за формулою (2.26).

Уявимо собі просторово-часовий механізм блукання шкідливих речовин. Направимо вісь  $t$  перпендикулярно угору, тобто перпендикулярно до площини блукання, і попробуємо встановити поверхню, для якої концентричні кола є лініями рівня. Враховуючи залежність (2.26), можна зробити висновок про параболічний характер зміни цієї поверхні (рис 2.23).



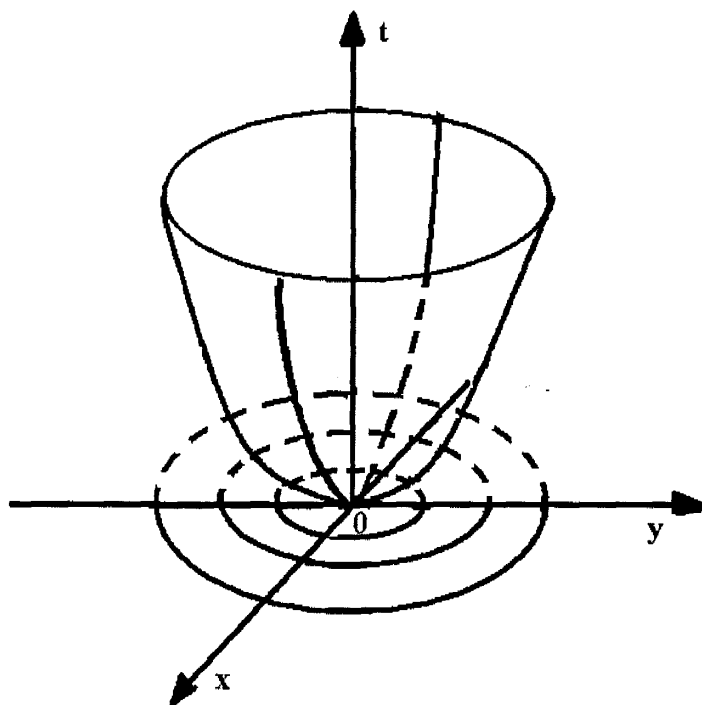


Рис.2.23. Просторово-часовий механізм блукання

Дійсно: 
$$t = \frac{1}{\alpha} r_{nl}^2 = \frac{1}{\alpha} (x^2 + y^2), \quad (2.36)$$

якщо тепер її перевернути і натягнути на контур  $\Gamma$  (не обов'язково круглий), то ми отримаємо якісний характер поверхні  $U$  концентрацій шкідливих речовин (рис.2.24).

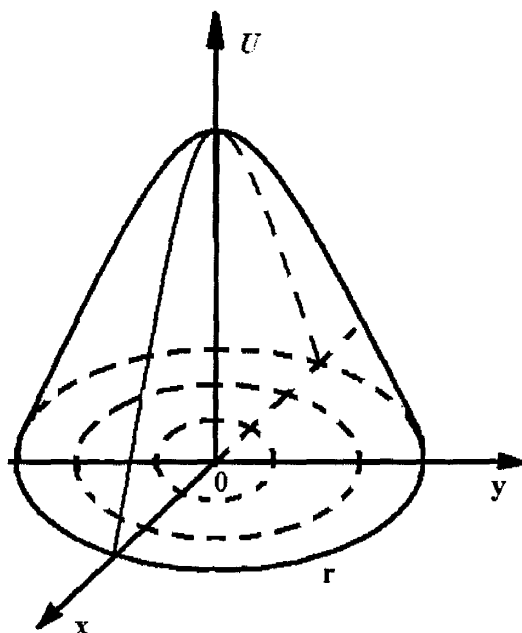


Рис. 2.24. Якісний характер поверхні концентрацій

Таке представлення поверхні концентрацій повністю узгоджується, наприклад, з мембранною аналогією, одержаною Прандтлем в 1904 р. при розв'язуванні задачі про рівновагу плівки, що натягнута на деякий контур і знаходиться під тиском. Отриманий результат також підтверджує правильність висновку про параболічний закон розподілу ймовірностей, пов'язаних з потенційною небезпекою внаслідок дії точкового джерела.

## **2.5. Інструментальні дослідження забруднення атмосфери калійними виробництвами у польових умовах**

У 2001 р. нами із співробітниками науково-дослідного інституту “Галургія” проведені інструментальні заміри у польових умовах з визначення кількості шкідливих речовин в районі розташування сіл: Кропивник, Кепське, Кадобне, Верхня, Негівці, Завадка, Ігуменів, Мостище, Копанки, Стефанівка, що перебувають в радіусі  $\sim 10$  км від промплощадки розміщення калійного і магнієвого заводів (додаток Б). Промислова площадка, на якій розташовані заводи, знаходиться на північному заході від міста Калуш.

Забруднюючі речовини з промплощадки надходять у ці райони при південному, південно-східному, південно-західному напрямках вітрів.

При вивченні впливу викидів заводу калійних добрив концерну “Оріана” на забруднення повітряного басейну необхідно мати на увазі наступне.

На тій же території промплощадки разом з заводом калійних добрив розміщені цехи заводу по виробництву магнію. Це підприємство мало значні викиди основних забруднюючих речовин повітряного басейну в регіоні.

В той же час завод калійних добрив не викидає хлору, а кількість хлористого водню, який в дуже незначних кількостях утворюється при висушуванні калійних добрив, настільки незначна, що підприємство навіть не звітується по цьому компоненту.

З цих двох підприємств, розміщених на одній промплощадці, висотний викид має тільки магнієве виробництво, (висота труби – 120 м).

Перед початком проведення досліджень ступеня забруднення атмосфери у вищенаведених пунктах є важливим визначення пріоритетних шкідливих речовин.

До пріоритетних шкідливих речовин належать такі, які впливають на стан забруднення атмосфери у даному регіоні.

Принцип визначення пріоритетних шкідливих речовин базується, в основному, на двох показниках: кількості шкідливої речовини, що викидається в повітря, і класу небезпечності цієї речовини [102,103].

Перелік пріоритетних шкідливих речовин, що підлягають контролю, складається після попередніх спостережень, які проводились для орієнтовної оцінки стану забруднення. Спираючись на це, для контролю були вибрані хлористий водень, хлор та калійний пил.

За пріоритетність перелічених шкідливих речовин і необхідність їх контролю в повітряному середовищі говорить й те, що вони викидаються іншими виробництвами і підприємствами регіону; отже сумарний їх викид в атмосферу буде набагато більший.

При інструментальних замірах за основу брали напрям вітру, в залежності від якого простежувалось поширення шкідливих речовин.

Кількісний склад шкідливих інгредієнтів в повітрі визначали із згідно-прийнятими нормованими методиками [104].

Існуючі норми ГДК<sub>м.р.</sub> для тих речовин, що визначались, становлять:

Cl<sub>2</sub> - 0,1 мг/м<sup>3</sup>;

HCl - 0,2 мг/м<sup>3</sup>;

калійний пил – 0,5 мг/м<sup>3</sup>.

Підбір методик для визначення концентрацій шкідливих речовин проводиться не тільки з метою оцінки стану повітря на даний час, але і для підбору точок замірів для постійного контролю (моніторингу) приземного шару повітря. Дослідження з визначення концентрації шкідливих речовин проводились з урахуванням вимог і правил виконання цих робіт, існуючих на цей час.

## 2.6. Підбір методик для визначення концентрації шкідливих речовин

Щоб обмежити надходження шкідливих речовин в атмосферу, розроблені нормативи, які визначають дозволена кількість викидів. Для перевірки виконання цих нормативів, одержання точного якісного і кількісного складу повітря розроблено багато методик для визначення шкідливих речовин, які знаходяться в повітрі. Оскільки склад повітря, а отже і кількісні показники компонентів, що визначаються в ньому, змінюються в дуже широких діапазонах в залежності від багатьох умов, то методики для визначення окремих компонентів складу повітря повинні мати високу чутливість і точність. Для порівняння отриманих результатів методики повинні бути апробованими, стандартизованими (уніфікованими) і затвердженими контролюючими органами.

Тому, для визначення забруднюючих речовин, які викидаються в атмосферу підприємством по виробництву калійних добрив, були підібрані і випробувані саме такі методики.

Оскільки з території промплощадки заводу калійних добрив викидаються хлор і хлористий водень, джерелом яких є виробництво магнію, яке розміщене на тій же промплощадці, підібрані і опробовані методики для визначення цих речовин. Ці методики використовуються як стандартні, затверджені службами по гідрометеорології і охорони здоров'я.

Оксиди азоту не є характерною речовиною виробництва калійних добрив. Єдине джерело утворення оксидів азоту - топки апаратів висушування. Але при великих коефіцієнтах надлишку повітря, при яких ведеться процес горіння, температура в топках майже не досягає тих значень, при яких відбувається утворення оксидів азоту. Якісний аналіз на наявність оксидів азоту підтверджує це.

У питанні про визначення кількості точок для попереднього виявлення концентрацій забруднюючих речовин поки що немає одного загальноприйнятого погляду. Кількість стаціонарних і маршрутних постів спостереження (тобто точок відбору) приведена тільки в залежності від кількості населення міста, хоч і додається, що ця кількість визначається в залежності від площі населеного пункту,

рельєфу місцевості і ступеня індустріалізації.

Конкретно приведена кількість точок відбору проб на вміст забруднюючих речовин: 1 точка на 1 км<sup>2</sup> площі для територій, що прилягають до промислових підприємств.

Враховуючи, що заміри проводились по напрямку вітрів, було прийнято саме останній принцип вибору точок відбору. А при тих напрямках вітрів, по яких іде розповсюдження шкідливих речовин від джерел викидів на житлову зону, кількість точок відбору збільшувалась.

Всього визначення концентрацій шкідливих речовин проведено в 140 точках по всіх напрямках вітрів.

По північно-західному, західному і північному напрямках вітрів визначення концентрацій проведено у 83 точках.

Результати досліджень аеротехногенного забруднення атмосфери у населених пунктах Калуського промислового району наведені у додатках А і Б. Встановлено, що при південних, південно-східних, західних, південно-західних вітрах спостерігається забруднення житлової зони сіл Калуського району в межах ~ до 3 км.

Специфічні забруднюючі речовини виробництва калійних добрив - пил калійної руди і пил калійних добрив, а також хлор і хлористий водень, що викидаються магнієвим заводом, при сухій і ясній погоді і швидкості вітру від 2 м/с і більше були виявлені по вище вказаних напрямках в районі сіл Кепське, Стефанівка, Кропивник. Спостерігались випадки перевищення норми ГДК по хлору, хлористому водню і калійному пилу. В селах Верхнє, Негівці, Завадка, Томашівці, Гуменів, Копанки перевищень ГДК по цих речовинах не зафіксовано.

Повна ліквідація викидів шкідливих речовин або значне їх зменшення можливе за рахунок розробки нових технологій і максимального очищення запилених потоків перед їх викидом в атмосферу.

## 2.7. Висновки з розділу

1. Проведено дослідження процесу седиментації шкідливих речовин, враховуючи їх фізичні та геометричні властивості.
2. Розроблено математичну модель пилового забруднення атмосфери на прикладі солевідвалів Домбровського кар'єру, що дозволяє оцінити масштаби забруднення території.
3. Розроблено математичну модель розсіювання аерозолів внаслідок промислових викидів. Розрахунки підтвердили те, що відстань, на яку шкідливі частинки відносяться вітром, залежить як від висоти труби, швидкості вітру, так і від густини та розмірів частинок, і може досягати більше 2000 м. Чим більше густина та розмір частинок, тим ближче від труби, через яку здійснюються викиди, вони будуть осідати.
4. Розроблено методику для визначення рівня забруднення приземного шару атмосфери. Апробація цієї методики, яка була проведена на розрахунках концентрацій шкідливих речовин в різних населених пунктах Калуського району, показала, що запропонована методика в силу своєї простоти дозволяє оперативно проводити експрес-аналіз аеротехногенного забруднення певної території.
5. Проведено дослідження поля ризику від точкового джерела небезпеки, а також побудовано поверхню розподілу ймовірностей потенційної небезпеки. Розподіл ймовірностей дає можливість кількісно оцінити величину екологічного ризику в довільній точці.

## РОЗДІЛ 3

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ЗОНИ АЕРАЦІЇ В РАЙОНІ СОЛЕВІДВАЛІВ ДОМБРОВСЬКОГО КАР'ЄРУ

Зона аерації, як відомо, охоплює ґрунти, поверхневі та підземні води, тобто ті компоненти навколишнього середовища, які збагачені киснем атмосферного повітря і є необхідними для життєдіяльності людини.

Пилові та газові речовини при викидах їх промисловими підприємствами випадають на поверхню ґрунтів і інфільтруються з дощовими та талими водами через зону аерації у підземні води. У відповідності з поставленими задачами у дисертації наші дослідження сконцентровані на оцінці даного фактору, тобто аеротехногенному забрудненні.

#### **3.1. Теоретичні та експериментальні дослідження формування ареалів забруднення ґрунтів**

Ґрунт має властивості, які відсутні у повітряному середовищі – частки ґрунту утворюють “дрібнокомірчастий фільтр”, який досить ефективно затримує шкідливі речовини, що осідають на їх поверхню і, таким чином, вони протягом кількох років і навіть десятиріч можуть утримувати ці речовини, не даючи останнім можливості перейти у ґрунтові води. Із закінченням адсорбційної ємності настає просочування – зовнішньо несподіване забруднення ґрунтових вод навіть без попадання шкідливих речовин. Ґрунти мають і значну здатність до регенерації. Багато “мешканців” ґрунту служать джерелом ферментів, в присутності яких шкідливі речовини розщеплюються швидше, ніж у воді або в повітрі. Фільтрування і накопичення домішок в ґрунтах, а також здатність ґрунтів до регенерації визначають їх буферну здатність по відношенню до антропогенних впливів. При зниженні здатності ґрунту до знезаражування шкідливих речовин останні можуть інтенсивніше

розповсюджуватись у навколишньому середовищі, ніж у випадку “здорового” ґрунту [105].

Формування ареалів забруднення у зоні аерації солевідвалами кар’єру і, насамперед, у ґрунтах можливе різними шляхами:

1. Осадження у вигляді пилу і аерозолей. Тверді та рідкі сполуки при сухій погоді звичайно осідають безпосередньо у вигляді пилу і аерозолів. Такі забруднення можна спостерігати візуально, наприклад, навколо котелен взимку сніг чорніє, покриваючись часточками сажі. Автомобілі, особливо в містах біля доріг, значно доповнюють забруднення ґрунтів.

2. З атмосферними опадами. Більшість хімічних сполук, які попадають в атмосферу в результаті роботи підприємств, потім розчинюються в крапельках атмосферної вологи і з опадами випадають в ґрунт. Це, в основному, гази – оксиди сірки, азоту та ін. Більшість з них не просто розчинюються, а й утворюють хімічні сполуки з водою, які мають кислотний характер. Таким чином і утворюються кислотні дощі [65].

3. При безпосередньому поглинанні ґрунтом газоподібних сполук. В суху погоду можуть безпосередньо поглинатися ґрунтом, особливо вологим.

4. З рослинним опадом. Різні шкідливі сполуки в будь-якому агрегатному стані поглинаються листками рослин або осідають на їх поверхні. Потім, коли листя опадає, всі ці сполуки потрапляють в ґрунт.

Охорона ґрунтів від забруднень є важливим завданням людства, оскільки будь-які шкідливі сполуки, що знаходяться в ґрунті, рано чи пізно потрапляють в організм людини [67].

Транспортні процеси між ґрунтом і повітрям є самими складними на відміну від інших шляхів переносу, оскільки тут велике значення відіграють обмінні процеси рідина + тверда фаза, рідина + газ, тверда фаза + газ.

При формуванні ареалів забруднення ґрунтів важливу роль відіграють процеси адсорбції, молекулярної дифузії та фільтрації.

Адсорбцією називають зв’язування молекул або атомів рідкої або газоподібної фаз на поверхні твердих тіл. Коефіцієнт адсорбції ґрунту визначається як



відношення концентрації адсорбованої речовини на твердому тілі до його концентрації у водному розчині у рівноваговому стані. Адсорбцію хімічних сполук у ґрунті можна описати двома способами – за допомогою рівнянь Ленгмюра та Фрейдліха [105].

Рівняння адсорбції Ленгмюра (ізотерма адсорбції) можна записати у вигляді:

$$\frac{x}{m} = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot C_e}{1 + K_2 \cdot C_e}, \quad (3.1)$$

де  $\frac{x}{m}$  - відношення маси адсорбованої речовини до маси адсорбента;

$K_1$  і  $K_2$  – константи;

$C_e$  – рівновагова концентрація речовини у розчині.

Відмітимо, що у рівнянні (3.1) теплота адсорбції не залежить від ступеня заповнення пор поверхні.

У рівнянні Фрейдліха, навпаки, припускають, що внаслідок гетерогенності адсорбуючої поверхні із збільшенням заповнення адсорбента теплота адсорбції падає.

Рівняння ізотерми адсорбції Фрейдліха можна записати так [105]:

$$\frac{x}{m} = K \cdot C_e^{\frac{1}{n}}, \quad (3.2)$$

де  $K$  – безрозмірна константа адсорбції.

Показник  $1/n$  дає можливість оцінити інтенсивність адсорбції.

Якщо представити рівняння графічно у логарифмічних координатах по осі X, то залежність  $x/m$  від концентрації є прямолінійною з нахилом  $1/n$ , а константа  $K$  визначається точкою пересічення цієї прямої з точкою координат.

Оскільки на процеси адсорбції впливають органічні сполуки ґрунту, то часто доцільно визначати коефіцієнт адсорбції відносно органічного вуглецю у ґрунті (ОВ). Такий коефіцієнт адсорбції  $K_{ov}$  можна визначити за формулою:

$$K_{ov} = \frac{K \cdot 100}{OB \cdot \%}. \quad (3.3)$$

Слід відзначити, що забруднюючі речовини адсорбуються не тільки на органічному матеріалі ґрунту, але і на мінеральній фракції (скелеті ґрунту), що знижує точність визначення коефіцієнта адсорбції.

Дифузійне перенесення є фізичним процесом, при якому молекули, атоми або іони в результаті теплового руху (броунівський рух) переміщуються із області більшої концентрації в меншу. За даними [106] у пористому об'ємі ґрунту дифузія протікає повільніше, ніж у рідинах. Сума факторів, що уповільнюють дифузію, кількісно оцінюють імпедансом. Останній є коефіцієнтом пропорційності між коефіцієнтом дифузії, що вимірюється у ґрунті і у рідині.

При аеротехногенному забрудненні ґрунтів солевідвалами процес дифузії відіграє основну роль. Дифузійний розподіл солей на одиницю площі, що піддалася сольовому забрудненню, можна оцінити за формулою [107]:

$$d = \frac{C_n}{e^{\xi^2}} \sqrt{\frac{D_\phi}{\pi \cdot t}}, \quad (3.4)$$

де  $D_\phi$  – коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/добу;

$C_n$  – концентрація солей на поверхні ґрунтів, мг/100 г ґрунту;

$\xi$  - величина, що вираховує ординату  $Z$ , яка відраховується з поверхні ґрунтів на

глибину,  $\xi = \frac{Z}{2\sqrt{D_\phi \cdot t}}$ ;

$t$  – час з початку виникнення дифузійного процесу, доба.

Відомо, що на поверхні ґрунтів (на покрівлі) спостерігається максимальна дифузійна витрата солей:

$$\partial_o = C_n \sqrt{\frac{D_\phi}{\pi \cdot t}}. \quad (3.5)$$

На рівні підшови ґрунту (перекриваючих суглинків) витрата солей набагато менше  $\partial_o$  і дорівнює:

$$\partial_m = \frac{C_n \cdot e^{4 \cdot D_\phi \cdot t}}{H^2}, \quad (3.6)$$

де  $H$  – потужність ґрунту, м.

Розрахунки дифузійних витрат за формулами (3.4-3.6) дають достатньо точні результати при  $\xi < 8 \div 2,0$ ; при великих  $t$  вони стають наближеними, причому, похибка зростає при збільшенні  $t$ . Із збільшенням  $t$  витрата солей шляхом дифузії на рівні покрівлі ґрунтів поступово зменшується, а на рівні підшови – зростає [107].

**3.1.1 Лабораторний аналіз процесів дифузії в глинистих ґрунтах.** Нами проведені дослідження з визначення коефіцієнта дифузії іонів хлору ( $Cl^-$ ) в алювіальних суглинках з природною вологістю 18-20% та у піщаних ґрунтах з вологістю 10-14% [108]. Досліди проводились у металевих трубках довжиною 15 см і діаметром 5 см з прорізами для пошарового відбору взірців на аналіз. Зверху кожної трубки розміщували шар сухої кухонної солі ( $NaCl$ ) товщиною 0,5 см. Запарафіновані 20 трубок (10 з алювіальними суглинками і 10 з піщаним ґрунтом) знаходилися у гідраторі протягом 60 днів.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що процес дифузії іонів у ґрунтах підпорядковується закону Фіка і коефіцієнт дифузії визначався за формулою [81, 109, 110]:

$$K = -\frac{0,1086}{t \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (3.7)$$

де  $K$  – коефіцієнт дифузії,  $\text{см}^2/\text{добу}$ ;

$t$  – час, доба;

$\operatorname{tg} \alpha$  - кутовий коефіцієнт експериментальних кривих (епюр концентрації солей).

Результати експериментів наведені у таблиці 3.1. Експериментальними дослідженнями процесів дифузії встановлено, що чим більша відстань до сольового шару, тим більший коефіцієнт дифузії іонів  $\text{Cl}^-$ . Це можна пояснити сукупністю гідратаційних та осмотичних процесів, що виникли внаслідок поглинання води при розчиненні солі. Встановлено також, що коефіцієнт дифузії залежить і від гранулометричного складу ґрунту. Як видно із таблиці 3.1, коефіцієнт дифузії у суглинках на відстані 140 мм від сольового шару становить  $0,28 \text{ см}^2/\text{добу}$  (проба 2с), у пісках –  $0,59 \text{ см}^2/\text{добу}$  (проба 10п).

Відмітимо, що негативна роль дифузії солей є, переважно, у зміні агрегатного стану глинистих мінералів. Крім цього, ґрунти набухають, збільшуючи вологість та зменшуючи їх механічні властивості.

Нами вивчалися якісні зміни структури взірців алювіальних суглинків після їх засолення. З цією метою проведено електронно-мікроскопічне дослідження структури ґрунтів за допомогою реєстрового електронного мікроскопу РЕМ (модель-2 японської фірми АКА) за методикою, описаною в роботі [111].

У засолених ґрунтах пройшло утворення щільної солевої кірки, що не дозволяє розглянути пиловато-глинисті фази ґрунтів, а на деяких ділянках взірців видно кристалики солей розміром 5-10 мкм (рис. 3.1).

Таблиця 3.1

Значення коефіцієнтів дифузії у суглинках (с) та у піщаних ґрунтах (п),  
см<sup>2</sup>/добу

№ проб	Точки відбору ґрунтів по висоті трубок, мм				
	10	60	90	120	140
1с	0,10	0,12	0,15	0,17	0,20
2с	0,09	0,01	0,13	0,18	0,28
3с	0,07	0,08	0,10	0,19	0,25
4с	0,12	0,14	0,17	0,21	0,21
5с	0,11	0,13	0,14	0,18	0,24
6с	0,13	0,12	0,15	0,17	0,18
7с	0,16	0,17	0,20	0,24	0,21
8с	0,09	0,11	0,19	0,20	0,26
9с	0,14	0,15	0,18	0,21	0,27
10с	0,10	0,12	0,17	0,20	0,26
1п	0,15	0,20	0,31	0,45	0,50
2п	0,17	0,23	0,30	0,35	0,40
3п	0,16	0,22	0,45	0,47	0,57
4п	0,11	0,16	0,37	0,40	0,45
5п	0,19	0,24	0,48	0,57	0,61
6п	0,13	0,18	0,35	0,40	0,43
7п	0,15	0,19	0,38	0,43	0,47
8п	0,16	0,20	0,28	0,50	0,53
9п	0,20	0,25	0,43	0,54	0,57
10п	0,17	0,24	0,41	0,52	0,59

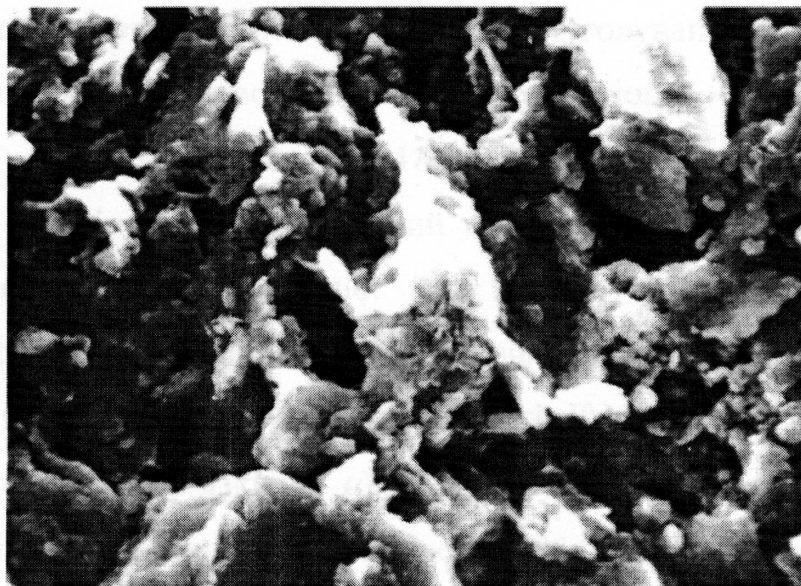


Рисунок 3.1. Фотознімки засоленних алювіальних суглинків

**3.1.2. Вивчення процесів водопроникності глинистих ґрунтів експериментальним шляхом.** Лабораторні дослідження залежності проникності глинистих ґрунтів від мінералізації вод виконані на взірцях алювіальних суглинків. Методика дослідів приведена в роботах [112, 113]. Дослідження проведені на компресійно-фільтраційному приладі М.Н. Маслова, фільтрація вод проходила зверху-вниз, об'єм взірця протягом дослідів зберігався постійним. Градієнт напору в досліді складав 10,7-60,3. Мінералізовані води з концентрацією солей 5, 10,

15 г/дм<sup>3</sup> були приготовлені штучно з розсолів вилуговування солевідвалу № 4. Склад солі у мінералізованих водах такий: серед катіонів – K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>; аніонів – Cl, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; температура розчину 18-20 °С. Відомо, що зміна проникності глин і глинистих ґрунтів - процес тривалий і, щоб він стабілізувався, тривалість лабораторних дослідів складала 50-60 діб.

При опису фільтрації у пористому середовищі прийнято окремо враховувати властивості ґрунту (через коефіцієнт проникності  $K_n$ ) і властивості фільтруючої рідини (за її густиною  $\rho$  і в'язкістю  $\mu$ ). При сукупності властивостей пористого середовища і фільтруючої рідини визначаються коефіцієнти фільтрації  $K_\phi$  [114, 115]:

$$K_\phi = K_n g \frac{\rho}{\mu},$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння.

Коефіцієнт проникності  $K_n$  залежить від діаметру частинок пористого середовища, величини ефективної (активної) пористості породи, структури порового простору, що визначається формою частинок і звивистістю порових каналів. У ґрунтах з незмінною структурою пористого середовища значення  $K_n$  повинно бути постійним, і іноді зміна  $K_\phi$  при фільтрації мінералізованих рідин може бути зв'язана лише зі зміною густини і в'язкості фільтруючих розчинів у порівнянні з впливом фізико-хімічних процесів, а тому зіставляюча оцінка водопроникності глинистих порід проведена нами з використанням коефіцієнта фільтрації.

Результати дослідів на кінцевий період спостережень (50-60 діб), які наведені в таблиці 3.2, показують, що в алювіальних суглинках коефіцієнт фільтрації прісної води складає  $(1-9,7) \cdot 10^{-5}$  м/добу, після фільтрації мінералізованих розчинів збільшується, причому для розчинів вод з мінералізацією 15 г/дм<sup>3</sup> збільшення складає  $(6-8,7) \cdot 10^{-4}$  м/добу.

Особливості змінювання водопроникності глинистих ґрунтів при тривалій фільтрації різних розчинів наведені у роботі [116]. Пояснення нами цієї особливості, що в деякій мірі узгоджується з іншими дослідженнями, зводиться до наступного.

**Значення коефіцієнтів фільтрації (м/добу) для алювіальних суглинків в залежності від мінералізації вод**

Мінералізація вод, г/дм <sup>3</sup> №№ лабора- торних проб	1	5	10	15
1с	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$9,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$
2с	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$
3с	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$
4с	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$7,7 \cdot 10^{-4}$
5с	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$8,6 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$
6с	$9,7 \cdot 10^{-5}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$
7с	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$8,1 \cdot 10^{-4}$

Алювіальні суглинки при тривалій фільтрації прісної води, хімічний склад і мінералізація якої близькі до аналогічних показників порового розчину, водопроникності не змінюють, оскільки фізико-хімічних змін у породі при цьому практично не проходить. При фільтрації через ці ж ґрунти мінералізованої води хлоридно-натрієвого або сульфатного типів, з однієї сторони, можливе збільшення дифузійних оболонок і збільшення кількості зв'язаної води за рахунок проникнення натрію в поглинаючий комплекс; з другої сторони - зменшення переходу катіонів з твердої поверхні глинистих частин в рідку фазу; це призводить до стиснення дифузійних оболонок, зменшення кількості зв'язаної води, збільшення активного порового простору і збільшення водопроникності.

**3.1.3. Дослідження ареалів забруднення ґрунтів у польових умовах.** Згідно з методичними рекомендаціями [117-119], зразки ґрунтів відбирались на відкритих ділянках, що віддалені від доріг не менше, ніж на 50 м, по конверту розміром 5х5 м, і об'єднувались в одну пробу. Відбір проводився з глибини 10-20 см. З проби



видалялись надземна і коренева частини рослин та уламки порід. Вага проби 1,2-1,5 кг. Відбір виконувався за існуючими методиками у відповідності з вимогами стандарту №17.04.3.01.83 та 17.4.4.02.84 і з врахуванням ґрунтової, ландшафтної та геоморфологічної карт.

Ґрунтовий покрив оцінювався з двох позицій: загальної характеристики, що охоплювала просторові закономірності розміщення основних типів ґрунтів і з еколого-техногенних позицій, що характеризують зміну ґрунтів, їх деградацію та забруднення.

Аналіз зразків ґрунту та сухого залишку проводився аналітичним методом – методом водних витяжок за методикою і в такій послідовності: відібрані проби осушували при температурі не більше 50 °С. Осушені проби роздрібнювалися до фракцій не менше 1 мм. З роздробленої проби ґрунту відбиралася наважка вагою 100 г, яку з'єднували із 500 мл дистильованої води. Потім суміш енергійно розмішувалася протягом 3 хвилин, а після цього суміш відстоювалася протягом доби (24 годин) і фільтрувалася. Рідка фаза аналізувалася, при цьому визначалися: густина, рН, сухий залишок, іони:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , сума солей.

Геохімічними дослідженнями встановлено 2 зони забруднення території солевідвалами №1 та №4 у південному та південно-західному напрямках [120].

У першій зоні підвищеного забруднення вміст іонів хлору у ґрунтово-рослинному шарі становив 120,7-150,3 мг/100 г ґрунту (рис. 3.2), а сульфат іонів 80-90 мг/100 г ґрунту. Ця зона примикає безпосередньо до солевідвалу №4.

Друга зона – зона помірного забруднення ґрунтів, розташована на відстані 1-3 км від солевідвалів. У межах зони вміст іонів хлору змінюється від 15,4 до 60,1 мг/100 г ґрунту, а сульфат іонів 40-50 мг/100 г ґрунту. Відмітимо, що фоновий вміст цих іонів становить відповідно 8-12 мг/100 г ґрунту та 5-7 мг/100 г ґрунту.

Дослідженнями встановлено прогресуюче засолення ґрунтово-рослинного шару та зменшення загальної мінералізації водних витяжок з глибиною. Загальна площа засолення у 5 разів перевищує площу джерел засолення – солевідвалів, і становить біля 400 га.

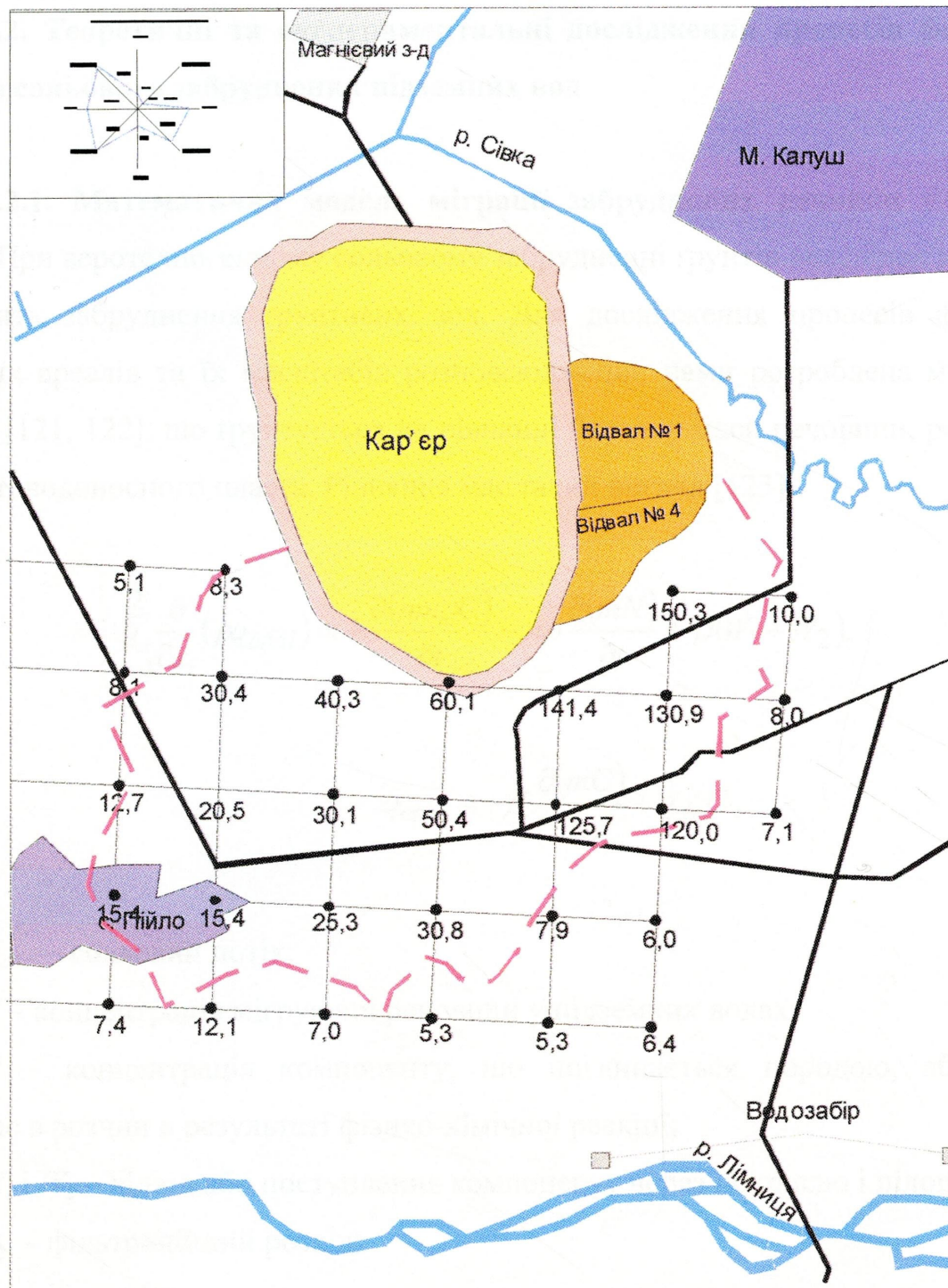


Рисунок 3.2. Карта аеротехногенного забруднення ґрунтів хлоридами солевідвалів Домбровського кар'єру, М1:25000

- — межа ареалу забруднення
- 150,3 - місце відбору проб ґрунтів та величина забруднення (мг/100 г ґрунту);
- автодороги.

### 3.2. Теоретичні та експериментальні дослідження процесів формування ареалів сольового забруднення підземних вод

**3.2.1. Математична модель міграції забруднених речовин у підземних водах.** При аеротехногенному сольовому забрудненні ґрунтів внаслідок інфільтрації проходить забруднення ґрунтових вод. Для дослідження процесів формування солевих ареалів та їх масштабів розповсюдження нами розроблена математична модель [121, 122], що ґрунтується на рівнянні балансу маси речовини, розчиненої в елементі водоносного пласта. Рівняння має такий вигляд [123]:

$$\sum_{i=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho q_{\text{соли}}) = -\frac{\partial (nm\rho C)}{\partial t} - n\rho \frac{\partial (mN)}{\partial t} + \rho(W_1 - W_2), \quad (3.8)$$

$$q_{\text{соли}} = -D \frac{\partial (mC)}{\partial x_i} + q_{\text{фи}} C, \quad (3.9)$$

де  $q_{\text{соли}}$  – сольовий потік;

$C$  – концентрація мігруючої речовини у підземних водах;

$N$  – концентрація компоненту, що поглинається породою, або навпаки поступає в розчин в результаті фізико-хімічної реакції;

$W_1$  і  $W_2$  – відвід або поступлення компоненту через покрівлю і підшову пласта;

$q_{\text{фи}}$  – фільтраційний розхід;

$m$  – потужність пласта;

$\rho$  – густина води;

$D$  – дисперсія;

$n$  – пористість.

Враховуючи, що  $x_i$  – координати декартової системи:  $x_1=x$ ,  $x_2=y$ ,  $t$  – час, розпишемо рівняння (3.8) при наступних припущеннях:  $\rho=\text{const}$ ,  $n=\text{const}$ ,  $m=\text{const}$ ,  $D=\text{const}$ ,  $W_1 - W_2 \rightarrow 0$ ,  $q_{\text{фи}}=0$ ,  $N$  – не залежить від часу  $t$ .

Отже, рівняння прийме вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = a^2 \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right), \quad a^2 = \frac{D}{n}. \quad (3.10)$$

Отримали диференціальне рівняння з частинними похідними параболічного типу.

Поставимо задачу: знайти концентрацію мігруючої речовини в підземних водах, яка задовольняє рівняння (3.10) при таких крайових умовах :

$$\text{початкова умова (п.у.): } C|_{t=0} = \varphi(x,y), \quad (x,y) \in G \quad (3.11)$$

$$\text{крайова умова (к.у.): } C|_{\Gamma} = \psi(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (3.12)$$

Тут  $G$  – досліджувана область в площині  $oxy$  ;

$\Gamma$  – межа області ;

$T$  – проміжок часу, протягом якого проводиться дослідження концентрації  $C$ .

Задача полягає в тому, щоб знайти розв'язок рівняння (3.10) в просторовій циліндричній області (в основі – область  $G$  , висота –  $T$  ), знаючи цей розв'язок на основі циліндра і на його бічній поверхні.

При розв'язанні цієї задачі застосуємо метод скінченних різниць (МСР), який є дуже поширеним серед чисельних методів. Згідно з МСР досліджувана область у просторі  $(x,y,t)$  покривається просторовою прямокутною сіткою з кроками дискретизації  $h_x$ ,  $h_y$ ,  $h_t$ . Припустимо, що  $h_x=h_y=h$ . Отже, неперервну область замінюємо дискретною: множиною точок, які називаються вузлами сітки. Введемо нумерацію вузлів  $(i,j,k)$ , де  $i$  – номер вузла по напрямку осі  $ox$ ,  $j$  – по напрямку осі  $oy$ ,  $k$  – по напрямку осі  $ot$ . Тепер задача полягає в тому, щоб знайти розв'язок у внутрішніх вузлах області, знаючи цей розв'язок в крайових вузлах.

В основі розв'язування рівнянь з частинними похідними методом скінченних різниць лежить скінченно- різницева апроксимація частинних похідних. Покажемо, як це робиться для рівняння (3.10). Для цього розглянемо будь-який внутрішній вузол  $(i,j,k)$  разом з сусідніми, використовуючи шаблон (рис. 3.3).

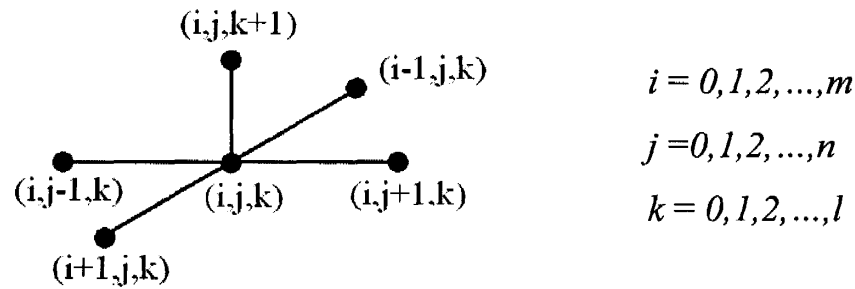


Рис.3.3. Обчислювальний шаблон

Похідну  $\frac{\partial C}{\partial t}$  наближено замінимо відношенням приросту функції до приросту аргументу при переході із одного вузла в другий – сусідній з ним:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{i,j,k+1} - C_{i,j,k}}{h_t};$$

Аналогічно:  $\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_1 \approx \frac{C_{i+1,j,k} - C_{i,j,k}}{h}; \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_2 \approx \frac{C_{i,j,k} - C_{i-1,j,k}}{h}.$

Тепер складемо скінченно-різницевий аналог другої похідної  $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ :

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \approx \frac{\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_1 - \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_2}{h} = \frac{C_{i+1,j,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i-1,j,k}}{h^2}.$$

Аналогічно:  $\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \approx \frac{\left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_1 - \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_2}{h} = \frac{C_{i,j+1,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i,j-1,k}}{h^2}.$

Підставивши ці похідні в рівняння (3.10), отримаємо його скінченно-різницевий аналог:

$$C_{i,j,k+1} = \frac{a^2 h_t}{h^2} (C_{i-1,j,k} + C_{i+1,j,k} + C_{i,j-1,k} + C_{i,j+1,k}) + \left(1 - \frac{4a^2 h_t}{h^2}\right) C_{i,j,k}.$$

Обчислення за цією формулою дозволяють, виходячи із відомих значень концентрації в п'яти точках часового рівня з номером  $k$ , знайти концентрацію в одній вузловій точці наступного часового рівня з номером  $(k+1)$ .

Обчислювальну формулу можна ще спростити, якщо врахувати умову стійкості:

$$1 - \frac{4a^2 h_t}{h^2} \geq 0.$$

Візьмемо граничний випадок умови і виразимо  $h_t$ :

$$h_t = \frac{h^2}{4a^2}.$$

Тоді обчислювальна схема прийме наступний вигляд:

$$C_{i,j,k+1} = \frac{1}{4} (C_{i-1,j,k} + C_{i+1,j,k} + C_{i,j-1,k} + C_{i,j+1,k}). \quad (3.13)$$

Отже, щоб знайти концентрацію  $C_{i,j,k+1}$  на часовому рівні  $(k+1)$ , треба знайти середнє арифметичне значень в сусідніх вузлах попереднього часового рівня.

Крайові умови (3.11), (3.12) запишемо відносно вузлів сітки:

$$\begin{aligned} \text{П.у. } C_{ij,0} = \varphi(x_i, y_j), \quad i = 0, 1, 2, \dots, m \\ j = 0, 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\text{К.у. } C_{ij,k/\Gamma'} = \psi(t_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, e. \quad (3.15)$$

Тут  $\Gamma'$  - бічна поверхня паралелепіпеда, апроксимуючого циліндричну поверхню,  $\psi(t_k)$  можна вважати сталою.

Для задання початкової умови (3.14) достатньо зробити заміри концентрації в вузлах сітки на нульовому часовому рівні (при  $t = 0$ ). Якщо крайову умову (3.15) забезпечити важко, то можна запропонувати принцип “піраміди” для знаходження концентрації за формулою (3.13) при заданій початковій умові (3.14). Але при цьому досліджувану область  $G$  (в площині  $oxy$ ) треба збільшити таким чином, щоб знайдені концентрації на деякому часовому рівні відповідали досліджуваній області  $G$ . Принцип “піраміди” зображено на рис.3.4.

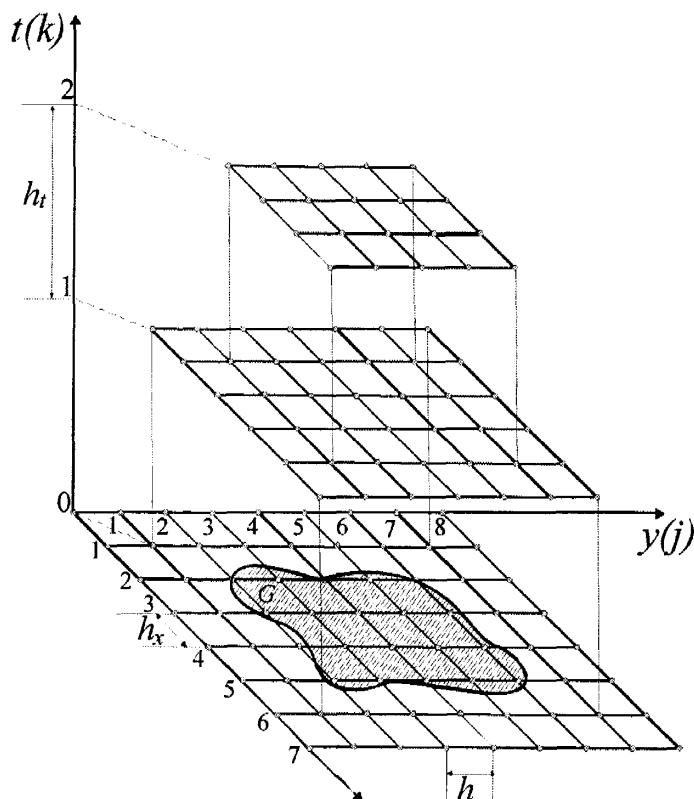


Рис.3.4. Принцип “піраміди” в МСР

Практично забезпечити початкову умову в даній задачі, тобто знайти концентрацію мігруючої речовини (на деякій глибині  $H$  в момент часу  $t = 0$ ) можна, застосовуючи спосіб обертання симплекса, розглянутого в розділі 2. При цьому використовуємо криниці та бурові свердловини, які можуть бути в досліджуваній області, з яких беруться проби води з метою визначення концентрації мігруючої речовини. Межу області побудуємо так, щоб вона пройшла через ці криниці та свердловини.

Покажемо, як працює дана методика при розв'язуванні практичної задачі з визначення концентрації підземних вод на глибині  $H = 5$  м. Досліджувана область була обмежена межею, на якій розташовані п'ять криниць –  $K_1, K_2, \dots, K_5$ , і три бурові свердловини –  $B_1, B_2, B_3$  (рис. 3.5).

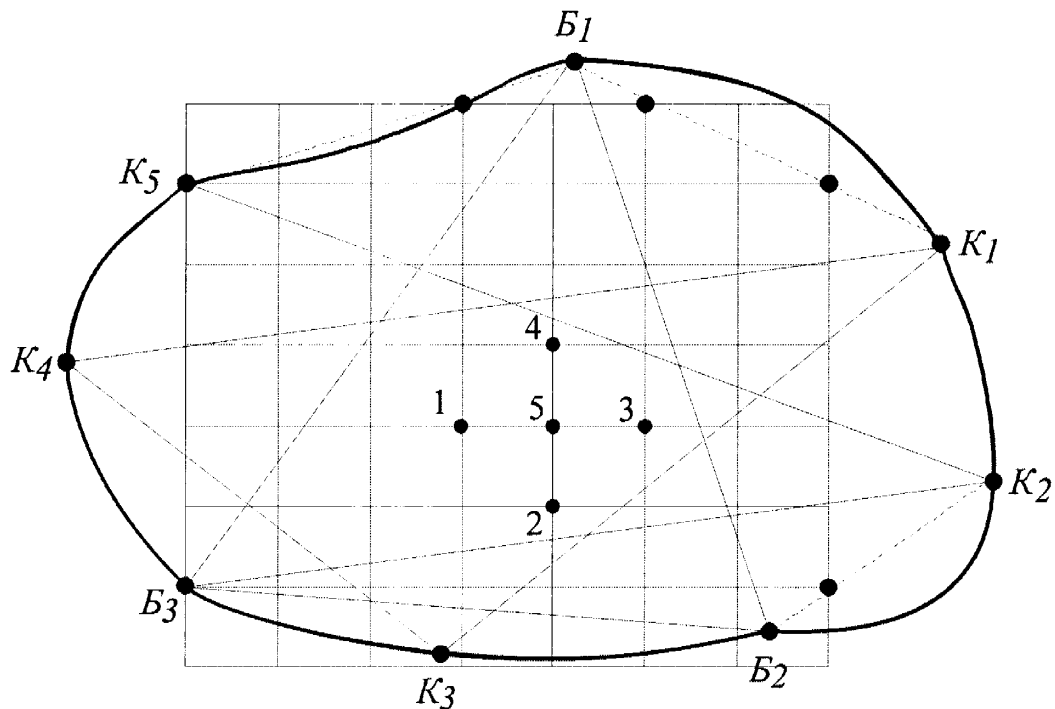


Рис.3.5. Розрахункова схема по визначенню концентрації забруднювачів

В результаті взятих проб води були визначені концентрації забруднювачів: для  $K_1 - 10,0$  г/дм<sup>3</sup>;  $K_2 - 8,2$  г/дм<sup>3</sup>;  $K_3 - 8,8$  г/дм<sup>3</sup>;  $K_4 - 9,2$  г/дм<sup>3</sup>;  $K_5 - 8,0$  г/дм<sup>3</sup>;  $B_1 - 8,6$  г/дм<sup>3</sup>;  $B_2 - 9,6$  г/дм<sup>3</sup>;  $B_3 - 8,4$  г/дм<sup>3</sup>. Після цього на досліджувану область була нанесена сітка з кроком  $h_x = h_y = 50$  м. Крок по часу  $h_t = \frac{h_x^2}{4a^2}$ , де  $a^2 = \frac{D}{n}$ . При  $D =$



0,04 м<sup>2</sup>/с,  $n = 0,1$  крок  $h_i$  склав приблизно 25 хв. Щоб визначити, яка буде концентрація, наприклад, в точці № 5 через 25 хв., достатньо за способом обертання симплекса знайти концентрації в точках № 1-4. Це і будуть початкові умови:  $C_1^{(0)} = 8,77$  г/дм<sup>3</sup>;  $C_2^{(0)} = 8,56$  г/дм<sup>3</sup>;  $C_3^{(0)} = 9,25$  г/дм<sup>3</sup>;  $C_4^{(0)} = 8,4$  г/дм<sup>3</sup>. Тоді, згідно з формулою (3.13) визначаємо концентрацію в точці № 5 на наступному часовому рівні:  $C_5^{(1)} = \frac{1}{4} \cdot (C_1^{(0)} + C_2^{(0)} + C_3^{(0)} + C_4^{(0)}) = 8,75$  г/дм<sup>3</sup>. Якщо порівняти з концентрацією в цій точці на нульовому рівні, на якому  $C_5^{(0)} = 8,95$  г/дм<sup>3</sup>, то можна зробити висновок, що з часом концентрація буде зменшуватись. Щоб внести корективи по уточненню концентрації забруднених підземних вод, які пов'язані з крайовими умовами, рекомендується через певний час взяти нові проби води і повторити розрахунки.

За допомогою такої процедури можна, забезпечивши за допомогою способу обертання симплекса початкову умову, розв'язати рівняння міграції методом скінченних різниць і, використовуючи принцип "піраміди", знайти концентрацію мігруючої речовини в підземних водах в будь-який інший момент часу.

Приведена математична схема дає можливість певною мірою охарактеризувати рівень забруднення у водоносних пластах. Вона дозволяє оперативно розв'язувати практичні задачі, пов'язані з прогнозом забруднення підземних вод.

**3.2.2. Експериментальні дослідження процесів засолення ґрунтових вод мінералізованими розчинами.** Засолення підземних вод у районі Домбровського кар'єру проходить розчинами, що утворюють систему  $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ . Дослідження процесів засолення, власне, підземних вод гравійно-галькових відкладів проводилися раніше фізичним моделюванням [124-127].

Було встановлено, що кожний компонент системи має різну швидкість міграції і вона набагато менша, ніж дійсна швидкість водяного потоку, причому аніони рухаються швидше, ніж катіони. Це явище Д.С. Коржинський пояснює [127] фільтраційним ефектом, під яким слід розуміти відставання розчиненої речовини від

розчинника під час фільтрації крізь пористе середовище. В.А. Жаріковим для доведення фільтраційного ефекту вивчалась фільтрація розчину електролітів  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeCl}_2$  через колонки, заповнені кварцевим піском. Результатами досліджень доведено, що концентрація катіонів на виході колонки у перших пробах була меншою, ніж у вихідних розчинах. В.С. Голубев і А.А. Габріянц [128] пояснюють ці явища іонним обміном між катіонами водяного потоку та іонами водню на поверхні кварцевого піску. Молекули  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ , які знаходяться на поверхні кварцу, взаємодіють з водою і утворюють кремнієву кислоту, що дисоціює відповідно до рівняння:  $\text{H}_2\text{SiO}_3 \leftrightarrow 2\text{H}^+ + \text{SiO}_3^{2-}$ . Силікатні іони, як менш рухливі, залишаються на поверхні піску і, як від'ємна частина, притягують до себе катіони, що і впливає на швидкість переміщення у фільтраційному потоці.

Для кількісної оцінки процесу взаємодії розчинених солей з поверхнею кварцевого піску, що є у більшості випадків заповнювачем гравійно-галькових відкладів, нами проведено ряд експериментів. Визначення сорбційної ємності піску проводили фільтрацією крізь нього спеціально приготовлених розчинів  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$  та  $\text{MgSO}_4$ . Мінералізація їх складала відповідно 20, 32 та 40 г/дм<sup>3</sup>. Для проведення дослідів використовувалася поліетиленова трубка довжиною 3 м і діаметром 20 мм. Методика визначення адсорбційних процесів за умови різних швидкостей фільтрації запозичена з роботи [128]. Перед заповненням трубки кварцевий пісок відмивали в киплячій соляній кислоті. Після заповнення трубки піском через неї пропускали дистильовану воду до встановлення фільтраційних витрат, за якими визначали швидкість та коефіцієнт фільтрації, а потім, з деякого фіксованого часу, в колонку подавали по чергово приготовлені розчини, які досліджували на сорбційність компонентів з початковими концентраціями  $C_0^{Na}$  і  $C_0^{Cl}$ ,  $C_0^K$  і  $C_0^{Cl}$ ,  $C_0^{Mg}$  і  $C_0^{SO_4}$ . На виході з колонки фільтрати піддавалися хімічному аналізу і у кожній пробі визначали відносні концентрації:

$$C^{-Na} = \frac{C^{Na}}{C_0^{Na}}; C^{-K} = \frac{C^K}{C_0^K}; C^{-Mg} = \frac{C^{Mg}}{C_0^{Mg}}; C^{-Cl} = \frac{C^{Cl}}{C_0^{Cl}}; C^{-SO_4} = \frac{C^{SO_4}}{C_0^{SO_4}},$$

де  $C_0^{Na}$ ,  $C_0^K$ ,  $C_0^{Mg}$ ,  $C_0^{Cl}$ ,  $C_0^{SO_4}$  - концентрації аніонів і катіонів у пробі фільтрату. Після кожного дослідів будувалися вихідні криві:  $C^{Na}(t)$  і  $C^{Cl}(t)$ ,  $C^K(t)$  і  $C^{Cl}(t)$ ,  $C^{Mg}(t)$  і  $C^{SO_4}(t)$ , (рисунок 3.6).

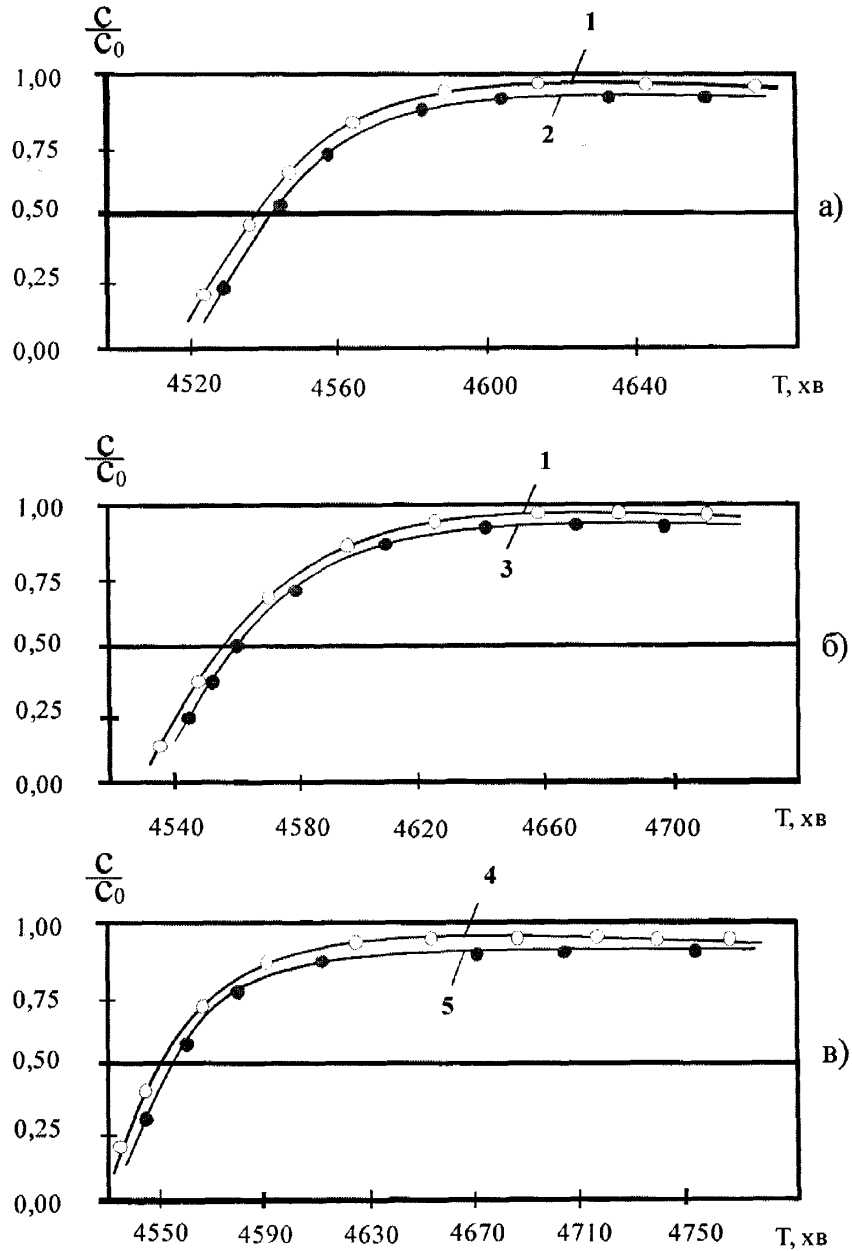


Рисунок 3.6. Вихідні криві для іонів хлору (1), натрію (2), калію (3), сульфатних іонів (4), іонів магнію (5) за умови швидкості фільтрації 1,79 м/доба; а) за умови фільтрації NaCl; б) за умови фільтрації KCl; в) за умови фільтрації MgSO<sub>4</sub>.

Для обробки експериментальних даних (таблиця 3.3) використано рівняння [129]:

$$\beta = \frac{n \cdot L}{V \cdot \Delta t},$$

де  $\beta$  - коефіцієнт розподілу іонів під час сорбції;

$n$  - пористість піску;

$L$  - довжина колонки, м;

$V$  - швидкість фільтрації, м/с;

$\Delta t$  — “зсув” вихідних кривих, що визначається за графіками для точок, де відповідно концентрація катіонів і аніонів дорівнює 0,5.

Таблиця 3.3

**Результати експериментальних даних з дослідження  
сорбційної ємності кварцевого піску**

Дійсна швидкість фільтрації, м/с	Коефіцієнт розподілу катіонів			Сорбційна ємність г/г піску		
	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
$8,7 \cdot 10^{-4}$	66	56	51	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-4}$
$1,1 \cdot 10^{-3}$	58	54	47	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$
$1,6 \cdot 10^{-3}$	54	51	46	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$
$2,0 \cdot 10^{-3}$	52	47	44	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-4}$

Кількість сорбованих іонів (сорбційна ємність (г/г ґрунту)) визначається за формулою [129]:

$$N = \frac{C_p}{\beta},$$

де  $C_p$  — рівноважна концентрація іонів, г/г.

Одержані лабораторні значення коефіцієнта розподілу катіонів ( $\beta=44-66$ ) свідчать про незначну адсорбцію їх поверхнею піску. Проте, незначні значення

сорбційної ємності піску по відношенню до катіонів  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  ( $2,3 \cdot 10^{-4}$  -  $9,7 \cdot 10^{-4}$  г/г піску) суттєво впливають на їх міграційну здатність.

Таким чином, одержані дані, а також результати досліджень [130,131] свідчать про особливості формування сольового забруднення підземних вод розсолами складного складу  $Na^+ - K^+ - Mg^{2+} - SO_4^{2-} - Cl^-$ , що зводяться до такого:

- іони хлору  $Cl^-$  мають найвищу здатність до переміщення у фільтраційному потоці в порівнянні з іншими компонентами системи, що залежить від дійсної швидкості потоку, і належать до несорбуючих компонентів;

- сульфат-іони  $SO_4^{2-}$  також належать до несорбуючих компонентів, і тому сульфатні іони та іони хлору застосовують як індикатори під час розв'язування різних гідрогеологічних задач. Вміст  $SO_4^{2-}$  лімітується присутністю у воді іонів  $Ca^{2+}$ , які утворюють з  $SO_4^{2-}$  порівняно малорозчинний  $CaSO_4$ ;

- іон  $Na^+$  по відношенню до міграційної здатності у фільтраційному потоці займає чільне місце серед катіонів. Більшість іонів натрію зрівноважуються іонами хлору, а менша частина - сульфатними іонами, утворюючи з ними рухомі і стійкі сполуки, які з достатньою швидкістю мігрують у водному середовищі;

- іон калію  $K^+$  за міграційною здатністю близький до іонів натрію, причому також утворює легко розчинні сполуки з головними аніонами ( $KCl$ ,  $K_2SO_4$ );

- іон магнію  $Mg^{2+}$  у порівнянні з іншими іонами має найменшу швидкість у водному потоці, оскільки найбільше сорбується піском.

Час, протягом якого сольові розчини, що інфільтруються у межах територій, піддалися вітровому засоленню і досягають експлуатаційних гідрогеологічних спостережних свердловин чи криниць, пропонуємо розраховувати за формулою:

$$T = t_1 + t_2, \quad (3.16)$$

де  $T$  – загальний час фільтрації сольових розчинів до спостережного пункту, доба;

$t_1$  – час руху розчинів у вертикальному напрямку через перекриваючий водоносний горизонт глинистих ґрунтів, доба;

$t_2$  – час руху забруднених вод у горизонтальному напрямку, доба.

$$t_1 = \frac{m_c \cdot n_c}{K_c \cdot I}, t_2 = \frac{L \cdot n_a}{K_a \cdot i}, \quad (3.17)$$

де  $m_c$  – потужність глинистих ґрунтів, м;

$n_c, n_a$  – активна пористість пористих глинистих ґрунтів та ґрунтів водоносного горизонту;

$I$  і  $i$  – відповідно градієнт напору при вертикальній фільтрації (приймається  $I=1$ ) та гідравлічний нахил потоку підземних вод;

$K_c$  і  $K_a$  – коефіцієнти фільтрації цих ґрунтів, м/добу;

$L$  – відстань від межі ділянки інфільтрації розчинів до спостережного пункту, м.

Середню дійсну швидкість руху підземних вод можна розрахувати за формулою:

$$v_{\text{дсп}} = \frac{1}{n_a} \left[ \frac{Q_i (\ln R - \ln r_i) + Q_e (\ln R - \ln r_e) + K_a \cdot I \cdot \cos \alpha}{2\pi L H} \right], \quad (3.18)$$

де  $\alpha$  – кут між напрямком руху підземних вод у природних умовах та лінією, що з'єднує центр ділянки інфільтрації і водозбору;

$H$  – середня потужність водоносного горизонту, м;

$Q_i$  – кількість водного розчину, що інфільтрується через покривні суглинки, м<sup>3</sup>/добу;

$r$  – приведений радіус ділянки інфільтрації, м;

$Q_e$  – дебіт водозбору, м<sup>3</sup>/добу;

$r_e$  – приведений радіус свердловини, криниці, м;

$R$  – розрахунковий радіус впливу або ширини зони впливу.

Відмітимо, що якщо свердловина або криниця розташована вниз за течією природного потоку підземних вод від ділянки інфільтрації, то  $\cos \alpha$  – позитивна величина, а якщо вгору, то – від'ємна.

Хімічний склад ґрунтових вод в районі солевідвалів №1 та №4, що залягають під ґрунтово-рослинним шаром на глибині 3-4 м, вивчався із проб, відібраних із криниць та спеціальних пробурених свердловин. Для об'єктивної оцінки якості ґрунтових вод їх характеристики порівнювались з фоновими значеннями, визначення яких проводилося по групі режимних пунктів спостережень за межами солевідвалів.

Дослідженнями встановлено значне засолення ґрунтових вод у даному районі, причому формування ареалів тут не зв'язано з водною ерозією солевідвалів, а з вітровою. Мінералізація ґрунтових вод у межах ареала сольового забруднення змінюється від 15,4 г/дм<sup>3</sup> до 1,5 г/дм<sup>3</sup> (рис. 3.7). Ареал забруднення ґрунтових вод співпадає у плані з ареалом засолення ґрунтово-рослинного шару.

### 3.3. Висновки з розділу

1. Проведено експериментальні дослідження з визначення коефіцієнтів дифузії іонів хлору у ґрунтах. Встановлено, що коефіцієнт дифузії залежить від гранулометричного складу ґрунтів і змінюється від 0,28 см<sup>2</sup>/добу у суглинках, до 0,59 см<sup>2</sup>/добу у пісках. Ці дослідження дозволяють кількісно охарактеризувати процеси молекулярної дифузії, які відіграють важливу роль при формуванні ареалів забруднення ґрунтів.

2. Довготривалими лабораторними дослідженнями вивчено і обґрунтовано явище збільшення водопроникності глинистих ґрунтів пропорційно збільшенню мінералізації фільтруючої води. Результати експериментів дають можливість оцінити рівень забруднення ґрунтів залежно від мінералізації вод.

3. Польовими геохімічними дослідженнями встановлено 2 зони забруднення солевідвалами № 1 і № 4 у південному та південно-західному напрямках.

У першій зоні підвищеного забруднення, що безпосередньо примикає до солевідвалу № 4, вміст хлоридів у ґрунтово-рослинному шарі становив 120,7-150,3 мг/100 г ґрунту, а сульфатів 80-90 мг/100 г ґрунту.



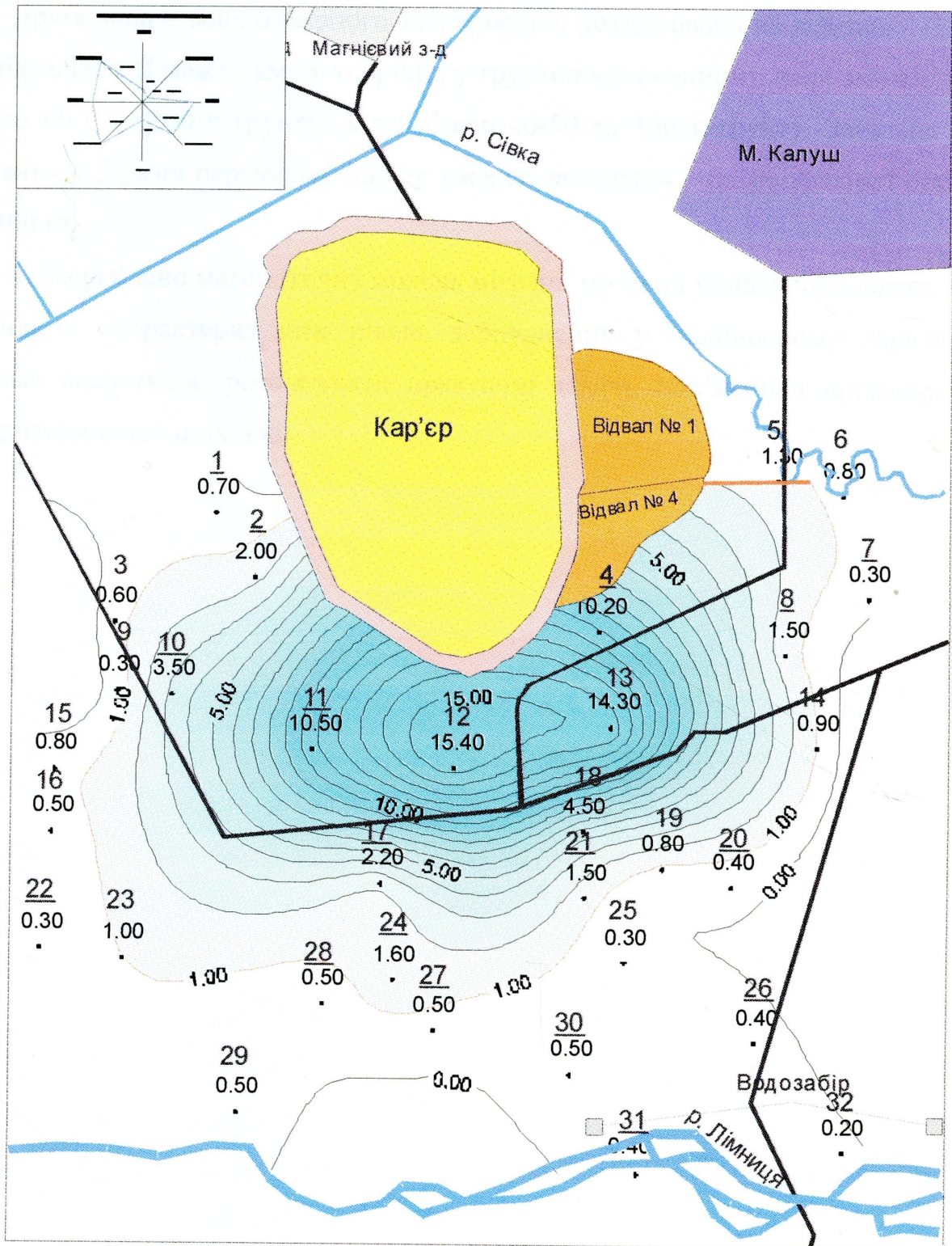


Рисунок 3.7. Схема сольового забруднення ґрунтових вод солевідвалами Домбровського кар'єру, М 1: 25000

- межа ареалу забруднення;
- автодороги;
- 15 гідрогеологічна свердловина та її номер  
0,80 мінералізація води (г/дм<sup>3</sup>)



Друга зона – зона помірного забруднення, розташована на відстані 1-3 км від солевідвалів; у її межах вміст хлоридів у ґрунтово-рослинному шарі змінюється від 15,4 до 60,1 мг/100 г ґрунту, а сульфатів 40-50 мг/100 г ґрунту. Загальна площа засолення у 5 разів перевищує площу джерел засолення – солевідвалів, і становить біля 400 га.

4. Розроблено математичну модель міграції речовин у підземних водах, що дає можливість охарактеризувати рівень забруднення у водоносному горизонті та дозволяє оперативно розв'язувати практичні задачі, пов'язані з прогнозуванням забруднення підземних вод.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ТА ЗАСОБІВ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ СТОСОВНО ВІДХОДІВ КАЛІЙНОГО ВИРОБ- НИЦТВА

Технологічні процеси переробки калійних руд супроводжуються виділенням в атмосферу пилу калійної руди і готового продукту, хлористого водню, який одержується в результаті часткового гідролізу хлоридів в процесі сушіння, і оксидів азоту, які утворюються при згоранні палива в сушильних агрегатах. Основна маса цих шкідливих домішок вловлюється на пилогазоочисних системах. Однак, значна кількість речовин потрапляє в атмосферу і потоками атмосферного повітря розноситься за межі санітарно-захисної зони.

У силу специфіки виробництва в атмосферу викидається хлор, хлористий водень і сірчистий ангідрид. Через недосконалість газоочисних систем досить велика кількість цих шкідливих токсичних речовин потрапляє у навколишнє середовище, змішуючись із викидами заводу магнієвого виробництва, що вимагає комплексних досліджень із врахуванням вищезгаданих факторів.

#### **4.1. Розробка технології та способу очистки атмосферного повітря від пилу на дробильно-сортувальних комплексах**

Технологічні процеси видобування та переробки калійних руд супроводжуються інтенсивним викидом у робочу атмосферу тонкодисперсного пилу, що викликає пневмоконіози та інші різновиди захворювань дихальних шляхів у працівників даної галузі. На даний час на об'єктах переробки калійних руд, зокрема на дробильно- сортувальних комплексах (ДСК) (рис. 4.1), для знешкодження пилу в повітрі, в основному, застосовують гідрознепилювання та аспірацію.

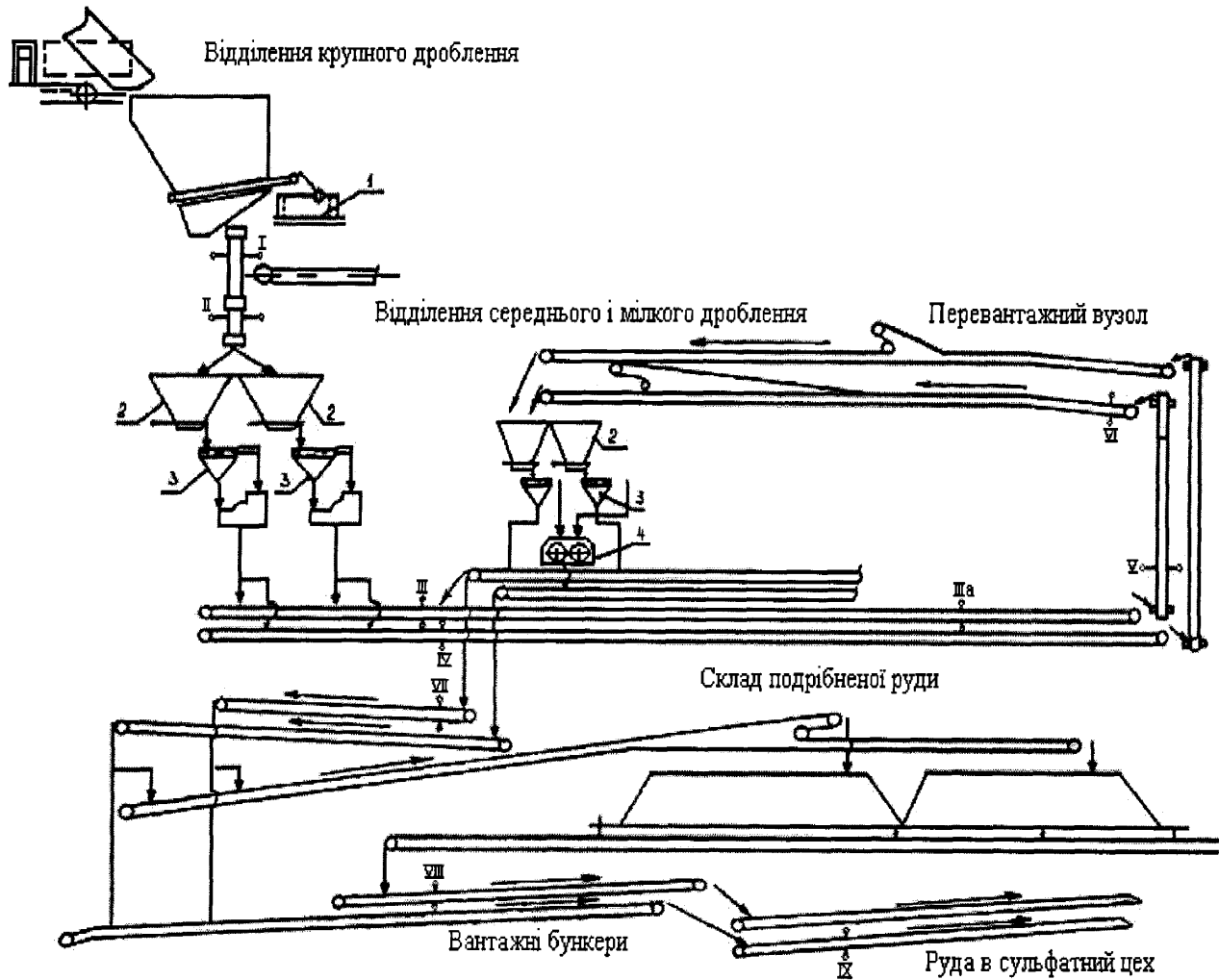


Рис. 4.1. Схема дробильно-сортувального комплексу та замірних постів

- 1 – дробилка щоква 1200 × 1500 мм;
- 2 – питотель, що гойдається (4 шт.);
- 3 – грохит вібраційний (4 шт.);
- 4 – дробилка валкова; ← → умовне позначення замірного поста.

Гідрознепилювання – це розпилення води форсунками, туманоутворювачами, зрошувальні системи тощо. Ефективність гідрознепилювання зі зниження запилення повітря не перевищує 50-60 % і, крім того, застосування цього способу обмежується кліматичними умовами, технологією виробництва та фізичними властивостями гірської маси, що переробляється. У більшості випадків використання гідрознепилювання обмежено допустимими межами зволоження перероблюваного матеріалу, перевищення яких частково або повністю порушують технологічні процеси (забивання

прохотів, зависання перезволоженої маси в бункерах, течках і т.д.), а при від'ємних температурах це призводить до змерзання корисних копалин.

Аспіраційними системами обладнуються всі дробильно-сортувальні фабрики й заводи. Раціональна експлуатація цих систем дозволяє знизити запилення повітря. Однак, весь комплекс виробничих умов, починаючи від клімату району розташування підприємства, технології переробки руд і до фізичних властивостей знешкодженого пилю, постійно здійснює вплив на продуктивність аспіраційних систем, яка без постійного контролю і наладки з часом знижується.

Великі габарити технологічного обладнання, велика протяжність транспортних трактів та висота перепадів, а також розкиданість джерел пилознешкодження не дозволяють якісно і з потрібною герметизацією локалізувати всі осередки запилення повітря. Практика свідчить, що такі технологічні процеси як вивантаження подрібненої руди на транспортери із бункерів майже не забезпечуються засобами аспірації, тому навіть у разі використання спеціально розроблених та герметично виконаних укриттів запиленість повітря на робочих місцях в десятки й сотні разів перевищує ГДК. Для досягнення зниження запиленості повітря до рівня ГДК в комплексі з аспірацією необхідно застосовувати високоефективний спосіб, що відповідає вимогам технології та рівню автоматизації виробництва [132].

Розв'язуючи поставлене завдання, нами було доведено, що таким способом пилознешкодження, який використовується в комплексі з аспірацією, є локалізація високоінтенсивних осередків пиловиділення з допомогою повітряно-механічної піни високої кратності. При цьому було проведено лабораторні і виробничі дослідження щодо можливості застосування пінного способу боротьби з пилом під час транспортування і у процесі перевантажування калійних руд, в лабораторних умовах визначено та проаналізовано дисперсний склад аерозолі транспортних галерей комбінагу, розрахунковим методом за певними розрахунками визначено необхідну для пилознешкодження кількість піни, проведено теоретичні, лабораторні та виробничі дослідження для визначення можливості застосування пінного способу боротьби з пилом на дробильно-сортувальному комплексі, розроблено методику та проведено в її

відповідності експериментальні дослідження взаємодії пилу калійних руд з пінами високоефективних піноутворювачів.

Відтак, для практичного застосування в умовах ДСК підібрано піноутворювач з раціональними та економічними концентраціями робочих розчинів, розроблено й успішно випробувано у виробничих умовах автоматизовану установку для знешкодження пилу повітряно-механічною піною високої кратності, доведено економічну ефективність застосування пінного способу боротьби з пилом [133].

Перевагами пінного способу боротьби з пилом є:

- екрануюча здатність піни;
- зв'язування часток пилу та видалення їх в зв'язаному вигляді разом із шаром транспортованої породи від джерела пиловиділення;
- високий коефіцієнт вловлювання (99%) тонкодисперсних, найбільш пневмоконіозонебезпечних часточок пилу (до 5 мкм);
- повна локалізація пінним шаром лінійних джерел пиловиділення, в тому числі які мають велику простягнутість;
- низький вміст піноутворюючої рідини порівняно із об'ємом піни;
- відсутність впливу на якість кінцевого продукту;
- широкий діапазон застосування як в умовах від'ємних, так і додатніх температур;
- висока економічність при впровадженні.

В сучасних умовах високомеханізованого гірничого виробництва застосування пінного способу боротьби з пилом повинно базуватись на повній автоматизації процесів генерування піни, регулюванні та стабілізації оптимальних робочих параметрів й блокуванні процесу пилознешкодження з пусковими механізмами обладнання. Ці вимоги дотримані в автоматизованій пилознешкоджуючій установці (АПУ), розробленій нами для виробничих умов дробильно-сортувального комплексу калійного заводу "Оріана" [133]. Для боротьби з пилом на ДСК ми використовували переносні пиловловлювачі типу ДПГ-10 (рис.4.2).

Пиловловлювач ДПГ-10 являє собою осьовий вентилятор, який змонтований разом із приводом (гідротурбіною) всередині корпусу. Робоче колесо пиловловлю-

вача встановлюється на валу гідротурбіни. При роботі гідротурбіни вода подається через напірний патрубок з витратою  $(3-5) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  під тиском  $(0,4-1,0) \cdot 10^6 \text{ Па}$  на лопатки робочого колеса гідротурбіни, обертаючи його, передає частину своєї енергії робочому колесу пиловловлювача і відводиться через боковий отвір кришки гідротурбіни в скидний патрубок. Оскільки колесо вентилятора, обертаючись, утримується в осьовому напрямку, а лопатки його закріплені на втулці під кутом до площини обертання, то насос переміщує потік газу вздовж осі, закручуючи його.

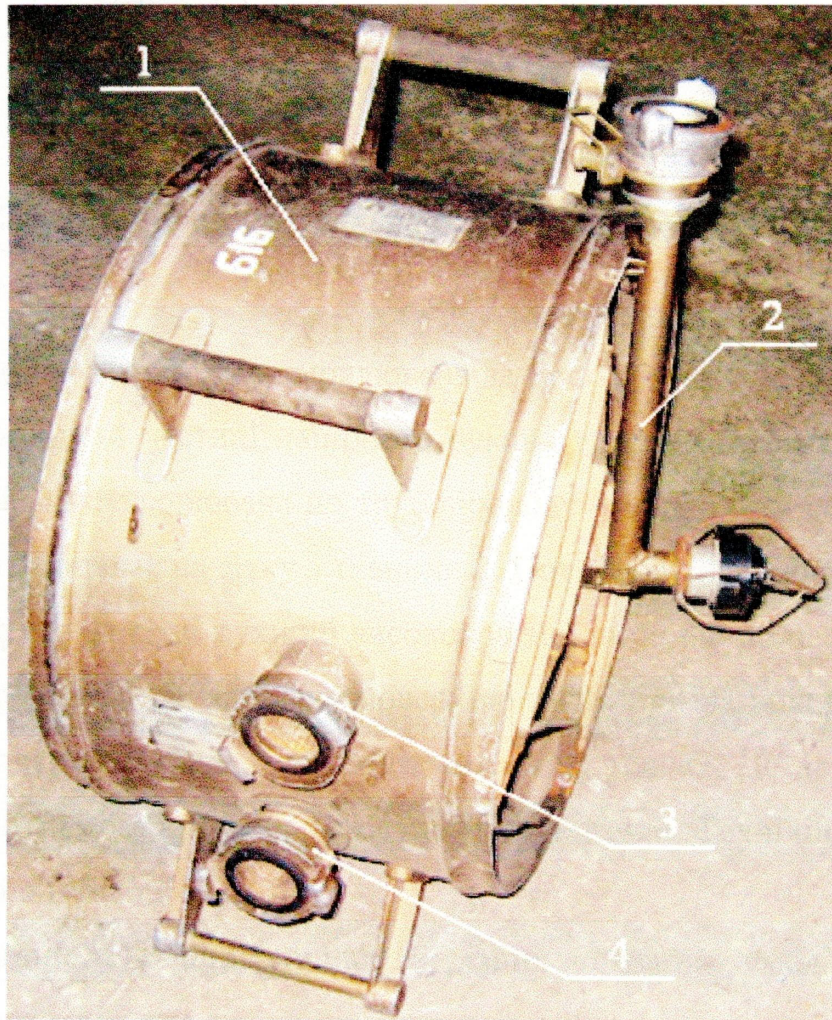


Рис. 4.2. Пиловнешкоджуюча установка ДПГ-10

- 1 – корпус пиловловлювача; 2 – піногенераторна установка ПГУ-120;  
3 – вхід в турбіну; 4 – вихід з турбіни.

В комплект ДПГ-10 з гідроприводом входять: пиловловлювач з гідротурбіною, всмоктуючий рукав, напірний рукав, піногенераторна установка ПГУ-120 (рис. 4.3).



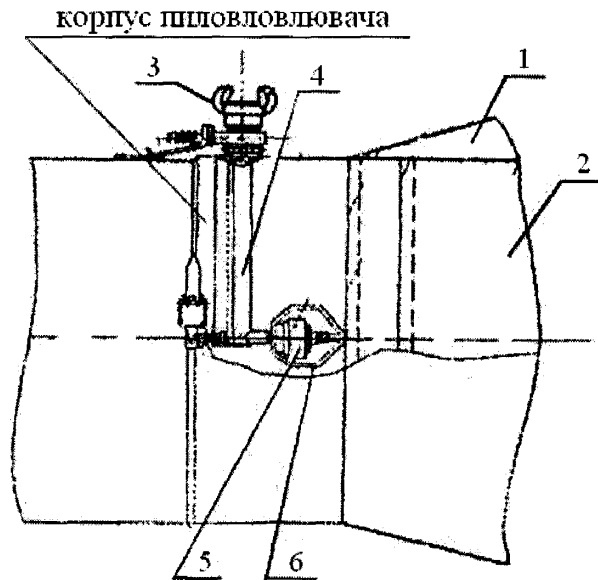


Рис. 4.3. Піногенераторна установка ПГУ -120

1 – рукав; 2 – сітка; 3 – з'єднувальна голівка; 4 – трубопровід; 5 – розпилювач; 6 – захисна сітка.

ПГУ-120 кріпиться до пилоловлювача за допомогою хомута із замком і розташовується в передній частині напірного рукава 1, приєднаного до з'єднувальної голівки 3. Розчин піноутворювача по трубопроводу 4 надходить до розпилювача 5, де розпилюється і попадає на сітку з тканини 2. Потік повітря від працюючого пило-всмоктувача видуває на сітці пухирці високократної піни, що по напірному рукаву 1 подається безпосередньо на запилену поверхню руди. Рукава виконані з тканинних матеріалів на сталевих кільцях, що розтягуються на тросах. Це дозволяє одержати мінімальні габаритні розміри у транспортному положенні. Технічна характеристика ДПГ-10 наведена в таблиці 4.1.

Випробування АПУ проводились за різних погодних умов, при змінних показниках вологості руди та навантаженнях на стрічкові конвеєри. Дві АПУ були встановлені на стрічкових конвеєрах, довжина яких складає 150 м, швидкість переміщення стрічки 1,6 м/с. Сумарна кількість транспортованої руди – 400-500 т/год. Швидкість запиленого повітряного потоку становила 0,6-1,0 м/с. Запиленість повітря до застосування піни та після включення АПУ замірювалась за загальноприйнятою методикою [134] на стаціонарних пунктах (таблиця 4.2). Результати виробничих випробувань приведено в таблиці 4.3.

## Технічна характеристика ДПГ-10

№ п/п	Показники	
1	Продуктивність по повітрю, тис. м <sup>3</sup> /год	10-12
2	Продуктивність по піні, м <sup>3</sup> /хв	120
3	Кратність піни при 6 %-му розчині піноутворювача, об. од., не менше	800
4	Продуктивність по розчину, дм <sup>3</sup> /с	2,5
5	Число обертів приводу, об./хв	3600
6	Діаметр робочого колеса, м	0,5
7	Довжина рукавів, м: - всмоктуючих - напірних	5 10

Вивчення технологічного процесу, стану технологічного обладнання та обстеження засобів знешкодження пилу на ДСК калійного заводу, які застосовувалися, показало, що аспіраційні системи АО-2, АО-3, АО-4, АО-5, АО-6, які служать для одночасного відсмоктування запиленого повітря у відділі середнього подрібнення із закритої частини стрічкових транспортерів під молотковими дробилками (поз. 202, 2012 відм. 1,80 м) та з грохотів (відм. 13,50 м), практично не ефективні. Укриття грохотів (кожуха), з яких здійснюється відсмоктування запиленого повітря, розгерметизовані, в результаті чого аспіраційні системи через наявні нещільності (щілини) відсмоктують повітря з робочого приміщення з відмітки 13,50 м, а для відсмоктування з відмітки 1,80 м у них не вистачає потужності. Крім того, в несприятливі періоди року руда на дробленні піддається підвищеній вологості (в основному, з кар'єра), в сухий період подається пара або вода на гідрознепилення, що призводить до швидкого зростання по всьому перерізу з подальшою цементацією повітрепроводів аспіраційних систем.

Приведемо розрахунки для оптимального режиму роботи АПУ. Розрахунок виконано з урахуванням потреби повітря для живлення двох пилознешкоджуючих установок, враховуючи, що кожна пилознешкоджуюча установка буде обладнана



Місце відбору проб та основні параметри мікроклімату на стрічкових транспортерах та у вузлах перевантажень подрібненої руди

№ п/п	№№ замірного посту за схемою Ж	Місце відбору проб	Атмосферний тиск в цеху, мм рт.ст.	Кількість транспортіваної руди, т/год	Кількість працюючого обладнання	Відносна вологість повітря, %	Температура повітря, С	Швидкість повітряного потоку, м/с	Вологість руди, %	Середня заплиєність повітря, мг/м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	I-I	<u>Відділення великого дроблення</u> Вихід дробленої руди з кожука укриття шохової дробилки (поз.28) на стрічковий конвейер ЛК 27; відм.-2,00 м	741	200	ЩД-28	83	19,8	2,8	1,95	217,7
2	II-II	<u>Відділення великого дроблення</u> Вихід дробленої руди з кожука укриття шохової дробилки (поз.28)+руда з шахти (вузол пересипки з ЛК 31 на ЛК 27) відм.-2,0 м	741	200	ЩД-28 ЩД шахти	83	19,8	3,8	1,38	269,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	III-III	<u>Відділення середнього дроблення</u> Вихід руди з кожуха укриття ЛК-202 (вихід руди з-під молоткових дробилок пп 222, 232, 242, 252) відм.+1,6 м	738	180	мд 232 мд 232	76	21,6	0,615	2,01	99,3
4	IV-IV	<u>Відділення середнього дроблення</u> Вихід дробленої руди з кожуха укриття ЛК212 відм.+1,60 м	738	180	мд 232 мд 232	76	21,6	0,373	2,62	99,7
5	V-V	<u>Відділення середнього дроблення</u> Вихід дробленої руди з кожуха конвейєра ЛК201 (вузол пересипки з ЛК 202 на ЛК201) відм. 15,0 м	738	180	мд 232 мд 232	76	21,6	0,553	2,71	24,3
6	VI-VI	<u>Відділення середнього та дрібного дроблення</u> Вихід дробленої руди з укриття кожуха ЛК-20 (вузол пересипки з ЛК 201 на ЛК 20) відм. + 11,0 м	738	180	мд 232 мд 232	76	21,6	0,485	2,83	61,0

Закінчення табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	VII-VII	Галерея транспортування руди на фабрику та склад Вихід дробленої руди з ко- жуха укриття ЛК-022 (вузол пересипки з ЛК 023 на ЛК 022) відм. + 4,6 м	738	180	мд 232 мд 232	76	21,6	-	2,63	154,7

Дані про ефективність пилознешкодження автоматизованою пилознешкоджуючою установкою

Вологість руди на конвеєрах, %	Запиленість повітря на виході руди з захисних кожухів АПУ			Запиленість повітря в середині конвейерів			Запиленість повітря після перевагнення подрібнених руд, конвеєр 201		
	До подачі пінни, мг/м <sup>3</sup>	Через 2 години після подачі пінни, мг/м <sup>3</sup>	Ефективність пилознешкодження, %	До подачі пінни, мг/м <sup>3</sup>	Через 2 години після подачі пінни, мг/м <sup>3</sup>	Ефективність пилознешкодження, %	До подачі пінни, мг/м <sup>3</sup>	Через 2 години після подачі пінни, мг/м <sup>3</sup>	Ефективність пилознешкодження, %
1,52	151,6 193,3 158,3	4,2 10,0 5,4	97,3 94,8 96,5	47,6 121,0 107,0	4,0 13,3 22,0	91,7 89,0 79,4	42,0 5,5 27,3	7,0 1,0 6,5	83,3 81,9 76,2
1,56-4,01	166,0 83,0 125,0	4,2 1,9 5,5	97,5 97,7 95,6	126,0 601,0 114,0	11,5 36,0 17,5	83,0 94,0 85,0	28,0 40,0 53,7	5,1 5,1 5,8	82,0 87,1 89,2
1,09-2,46	260,0 175,0 178,3	14,1 5,4 4,1	94,6 96,9 97,7	59,0 77,0 4,1	5,1 7,2 0,7	91,3 90,6 99,8	64,0 67,0 87,0	12,8 8,1 9,2	80,0 88,4 90,0
1,16-3,04	378,3 625,0 292,0	1,6 13,0 1,6	99,5 98,0 99,5	68,0 146,0 174,0	10,2 8,7 19,1	85,0 92,0 90,0	139,0 141,0 128,0	9,3 13,1 11,0	93,3 91,0 92,0
—	138,3 223,3 146,6	3,1 5,0 3,1	97,8 97,8 97,7	67,0 99,0 101,0	8,0 10,0 8,8	88,0 90,0 90,3	98,4 111,4 113,7	8,8 7,7 5,6	93,0 93,1 95,1

піногенератором високої ефективності. Основні робочі параметри АПУ такі: концентрація робочого розчину – 4-6 %; витрати робочого розчину – 0,084-0,096 м<sup>3</sup>/год; тиск стиснутого повітря – 0,09-0,15 МПа; витрати стиснутого повітря на 1 піногенератор – 78-84 м<sup>3</sup>/год; швидкість запиленого повітряного потоку – 0,6-1,0 м/с; кратність генеруючої піни – 800-1200 об'ємних одиниць.

Оскільки кожен піногенератор споживає в середньому 80 м<sup>3</sup>/год стиснутого повітря, отримаємо:

$$2 \times 80 = 160 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Розрахунок необхідної кількості піноутворюючої рідини при середній витраті:

$$2 \times 1,5 = 3 \text{ дм}^3/\text{хв} = 0,18 \text{ м}^3/\text{год} = 4,32 \text{ м}^3/\text{добу} = 1576,8 \text{ м}^3/\text{рік.}$$

Із них:

а) поверхнево-активної речовини марки ПО-6 ТС з урахуванням її концентрації в розчині:

$$\frac{1576,8 \times 4}{100} = 63,072 \text{ м}^3/\text{рік,}$$

б) технічної води з урахуванням застосування концентрації піноутворюючої рідини:

$$\frac{1576,8 \times 96}{100} = 1513,728 \text{ м}^3/\text{рік.}$$

Враховуючи одночасну роботу на оптимальному режимі всіх рекомендованих до впровадження АПУ, зволоження руди практично не буде.

$$180:500 = 0,36 \text{ дм}^3/\text{т руди},$$

де: 180 – розхід піноутворюючої рідини,  $\text{дм}^3/\text{год}$ ;

500 – навантаження по руді, т/год.

Живлення АПУ повітрям та піноутворюючою рідиною необхідно передбачити централізовано. Параметри зрошувальної рідини приведені у табл. 4.4.

Розрахунки показують, що дві ємкості по  $65 \text{ м}^3$  забезпечують місячну потребу в піноутворюючому розчині, причому його приготування можна буде здійснювати не частіше 2-х разів на місяць.

Слід зауважити, що в умовах підвищеної вологості повітря або при дії низьких температур, щоб уникнути перезволоження та змерзання корисних копалин, концентрацію поверхнево-активної речовини (ПАР) можна збільшити до 7-9 %. Збільшення ж кількості ПАР більше 9 % суттєво підвищує вартість розчину, але практично не впливає на підвищення ефективності способу [133].

#### **4.2. Природоохоронні заходи при реконструкції та розташуванні нових калійних виробництв**

Обґрунтування і вибір комплексу заходів охорони навколишнього середовища залежать не тільки від територіального розташування підприємств, але і повинні базуватися на оцінці необхідної і достатньої загальної ефективності із врахуванням складу, кількості шкідливих домішок, особливості планування проммайданчиків і умов штучного провітрювання.

Зниження аеротехногенного навантаження на довкілля калійними виробництвами зводиться до розробки та втілення таких комплексних заходів, які можна розділити на 5 основних груп:

1. Повна ліквідація шкідливих викидів в атмосферу і, перш за все, на території проммайданчиків.

2. Різке зменшення викидів домішок в атмосферу проммайданчиків і прилягаючих до них селітебних зон.

Параметри зрошувальної рідини до і після зрошення

№ п/п	Найменування	Питома вага, г/см <sup>3</sup>	Температура, °С	Сума солей, г/л	рН	Солевий склад, %						
						NaCl	KCl	MgCl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O
1	Вихідна	1,000	18	0,79	7,18	0,03	0,02	0,004	0,013	0,012	0,01	99,92
2	зрошувальна	1,000	19	0,83	7,14	0,02	0,03	0,0041	0,012	0,01	0,01	99,91
3	рідина	1,000	20	0,82	7,15	0,02	0,02	0,004	0,01	0,01	0,01	99,91
1	Відпрацьована	1,004	23	11,10	7,85	0,21	0,07	-	0,38	0,42	0,03	98,88
2	зрошувальна	1,002	23	9,8	7,70	0,12	0,01	-	0,44	0,38	0,03	99,02
3	рідина	1,005	25	11,8	6,60	0,10	0,09	-	0,502	0,46	0,028	98,80

3. Забезпечення максимального використання штучного провітрювання промайданчиків і мінімальне забруднення їх окремих зон.

4. Запобігання надходження шкідливих домішок в селітебні зони.

5. Зниження концентрації шкідливих домішок, які надходять в селітебні зони, до рівня гранично-допустимих.

До основних заходів першої групи відносяться: застосування замкнених технологічних циклів, безвідходних, нових або реконструйованих технологій, при яких відсутні викиди всіх шкідливих домішок або найбільш токсичні викиди із характерних для попередніх технологій, процесів; використання малосірчистого палива; перехід на централізоване тепlopостачання і ліквідація дрібних котельних установок; газифікація та електрифікація промислових підприємств.

Головними заходами другої групи є: застосування ефективних пилоочисних і газоочисних установок, колекторних систем централізованого відводу забрудненого повітря і нейтралізації природним або штучним шляхом шкідливих компонентів промислових викидів; регламентація гранично-допустимих викидів для кожного цеху виробництва з урахуванням рівня штучного фону і перспектив розвитку галузі.

Основні заходи третьої групи включають: вибір промислових будинків раціональних розмірів і форми; оптимальне планування і розміщення різних виробництв на промислових майданчиках; оцінка рельєфу місцевості і мікрокліматичні особливості місцевості, розміщення підприємства; обґрунтування найбільш цілеспрямованого розміщення джерел викидів.

До головних заходів четвертої групи відносяться: розробка генеральних схем раціонального розміщення промислових центрів; планування розвитку економічних районів; розміщення або реконструкція зон різного призначення на території міста з урахуванням рози вітрів і рельєфу місцевості; винесення підприємств за межу міста або населеного пункту.

Заходи, які найчастіше використовуються – це заходи 5-ї групи. До них належать: створення між цими районами і промисловими підприємствами спеціальних санітарно-захисних зон; розширення площадок зелених насаджень в містах і селах; використання висотних труб для технологічних і вентиляційних викидів.



Заходи з раціонального розміщення забудівель на проммайданчиках, спрямовані на максимальне використання вітрової енергії для їх провітрювання з урахуванням наукових досліджень [134-137], в основному зводяться до наступного:

1. Доцільно передбачити на одному проммайданчику промислові будівлі однакової висоти і розміщувати їх довжиною перпендикулярно до переважаючого напрямку вітру.

2. При поєднанні будівель різної висоти їх необхідно об'єднувати в групи однакової висоти і розміщувати ці групи по мірі збільшення висоти в сторону переважаючого напрямку вітру.

3. З навітряної сторони промплощадки потрібно розміщувати короткі, вузькі будівлі, ширина яких в напрямку руху вітру рівна або менша 2,5 висоти будівлі, широкі (більше 2,5 висоти будівлі), а також широкі і довгі будівлі.

4. Найбільш високі, довгі, вузькі будівлі потрібно розміщувати з завітряної сторони проммайданчика.

5. При послідовному розміщенні будівель:

а) найменша відстань між суміжними будівлями – не менше 4-х висот;

б) при поєднанні широких і вузьких будівель доцільно їх ряди чергувати, починаючи з першого по напрямку широких будинків;

в) при поєднанні довгих і коротких будівель необхідно їх ряди чергувати, починаючи з першого по потоку ряду коротких будівель.

Розміри санітарно-захисних зон для широких або вузьких будівель, які розміщені окремо при різних лінійних розміщеннях, а також точкових джерел можуть бути визначені за залежностями, наведеними в таблиці 4.5 [138, 139].

Одночасно з оцінкою розмірів санітарно-захисних зон для підприємств, що виділяють шкідливі домішки, які можуть нагромаджуватися в поверхневому шарі ґрунту і після цього виділятися в атмосферу, доцільно встановлювати граничний період експлуатації підприємства. Концентрації домішок, які обумовлені цими виділеннями, повинні враховуватися при оцінці ефективності комплексу заходів по нормалізації складу атмосфери на промислових майданчиках і селітебних територіях, які до них прилягають [140-142].

## Розміри санітарно-захисних зон

Місце розміщення джерела домішок і тип будівлі	Мінімальний розмір санітарно-захисної зони	
	Лінійне джерело	Точкове джерело (поздовжня вісь)
В навітряній циркуляційній зоні широких забудовель	$X = \frac{7,2M_l}{v l (C'_{гдж} + C'_o)} - b$	$X = \frac{15M_m}{v l (C'_{гдж} + C'_o)} - b$
На даху широкої забудівлі поза навітряною циркуляційною зоною	$X = \frac{1}{v l} \cdot \left( \frac{7,2M_l}{C'_{гдж} + C'_o} - 7,2L \right) - b_3$	$X = \sqrt{\frac{1}{v} \cdot \left( \frac{55M_m}{C'_{гдж} + C'_o} - 55L \right)} - 1,4l$
В завітряній циркуляційній зоні широкої забудови	$X = \frac{7,2M_l}{v l (C'_{гдж} + C'_o)}$	$X = \sqrt{\frac{55M_m}{v (C'_{гдж} + C'_o)}} - 1,4l$
В єдиній циркуляційній зоні вузької забудівлі	$X = \frac{7,2M_l}{v l (C'_{гдж} + C'_o)} - b$	$X = \sqrt{\frac{55M_m}{v (C'_{гдж} + C'_o)}} - (b + 1,4l)$

де  $M_l$ ,  $M_m$  – інтенсивність виділення домішок відповідно до лінійних і точкових джерел, мг/с;

$v$  – швидкість вітру, м/с;

$l$  – довжина забудівлі в напрямі, перпендикулярному до руху вітру, м;

$C_{гдж}$ ,  $C_o$  – гранично допустима концентрація домішок в атмосферному повітрі населених пунктів і фонова концентрація, мг/м<sup>3</sup>;

$b$ ,  $b_3$  – ширина забудівлі і віддаль від джерела до завітряного краю будинку, м;

$L$  – кількість забрудненого повітря, яке викидається джерелом, м<sup>3</sup>/с.

При сумісній дії декількох лінійних джерел різної інтенсивності, розміщених в різних місцях, розміри санітарно-захисної зони орієнтовно (з похибкою, яка не перевищує ширину забудівлі) можуть бути розраховані за формулою:

$$X = \frac{7,2M_{заг}}{vI(C_{ГДК} + C_0)}, \quad (4.1)$$

де  $M_{заг}$  – сумарна інтенсивність виділення домішок всіма лінійними джерелами, мг/с.

При сумісній дії декількох точкових джерел розміри санітарно-захисної зони повинні визначатися по максимальній сумарній концентрації домішок, яка утворюється на її межі всіма точковими джерелами і фоном, і яка не повинна перевищувати  $C_{ГДК}$ .

Розміри санітарно-захисних зон повинні розраховуватися, виходячи із значень  $C_{ГДК}$  для шкідливих речовин, які містяться у викидах, а при наявності у викидах декількох домішок речовин спрямовуючої дії – їх сумісного несприятливого впливу.

Основні заходи щодо зменшення аеротехногенного забруднення довкілля промисловими калійними підприємствами наведені в таблиці 4.6. Залежності, що наведені в таблиці 4.6, дають змогу визначити розміри санітарно-захисної зони при окремій дії лінійного або точкового джерела.

Таблиця 4.6

**Основні заходи зменшення аеротехногенного забруднення довкілля промисловими калійними підприємствами**

№ п/п	Група заходів	Зміст заходів
1	2	3
1	Повна ліквідація шкідливих викидів в атмосферу.	Застосування замкнених технологічних циклів, безвідходних, нових або реконструйованих технологій; використання малосірчистого палива; централізоване теплопостачання; газифікація джерел забруднення.

## Продовження таблиці 4.6

1	2	3
2	Зменшення викидів шкідливих домішок в атмосфері промайданчиків та прилягаючих до них селітебних зон.	Застосування ефективних пило- та газоочисних установок, колекторних систем централізованого відводу забрудненого повітря. Нейтралізація природним або штучним шляхом шкідливих компонентів промислових викидів; регламентація гранично-допустимих викидів для кожного цеху виробництва з урахуванням рівня штучного фону та перспектив розвитку галузі. Рекультивація зовнішніх солевідвалів.
3	Забезпечення максимального використання штучного провітрювання промайданчиків та мінімальне забруднення окремих зон.	Вибір промислових будинків раціональних розмірів і форми; оптимальне планування і розміщення різних виробництв на промислових майданчиках; оцінка рельєфу та мікрокліматичних особливостей місцевості для розміщення підприємств; обґрунтування найбільш оптимального розміщення джерел викидів.
4	Запобігання надходження шкідливих домішок у селітебні зони.	Розробка генеральних схем раціонального розміщення промислових центрів; розміщення або реконструкція зон різного призначення на території міста з урахуванням рози вітрів і рельєфу місцевості; винесення підприємств за межі населених пунктів.
5	Зниження концентрації шкідливих домішок до рівня гранично-допустимих, що надходять у селітебні зони.	Створення обґрунтованих санітарно-захисних зон в зоні дії промислових підприємств; розширення майданчиків зелених насаджень у місті; використання висотних труб для технологічних та вентиляційних викидів.

### 4.3. Висновки з розділу

1. Розроблено та випробувано у виробничих умовах автоматизовану пилозне-шкоджуючу установку для боротьби з пилом на дробильно-сортувальних комплексах.

2. Удосконалено метод очищення повітря від пилу з використанням поверхнево-активних речовин у процесі переробки калійних руд та під час їх транспортування.

3. Для зниження запиленості повітря в цехах великого, середнього і дрібного дроблення необхідно застосовувати комплекс засобів боротьби з пилом, який включає автоматизовані пилознешкоджувальні установки, аспіраційні пристрої та загальнообмінну вентиляцію. Загальна ефективність комплексу вказаних засобів боротьби з пилом повинна становити 99,9 %, а складових компонентів: пінного способу – 99 %, аспірації – 80 % та загальнообмінної вентиляції – 60 %.

4. Піна не повинна перезволожувати транспортуючу руду, гранична вологість якої встановлена в межах 3-4 %. В зв'язку з цим для пилознешкодження повинні застосовуватися тільки піни високої кратності порядку 800-1200 об'ємних одиниць.

5. Для ефективної роботи установок по знешкодженню осередків виділення пилу повітряно-механічною піною високої кратності на вузлах, де швидкість поступаючого на очистку запиленого повітряного потоку перевищує 1,2 м/с, в комплексі з пінним способом необхідно застосовувати аспірацію, оскільки при швидкостях вище 1,2 м/с починається прискорене руйнування пінного екрану, і, отже, знижується ефективність пилоочищення.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішено важливе екологічне науково-прикладне завдання, що полягало у розробці та впровадженні заходів та засобів із забезпечення екологічної безпеки у районі розташування гірничо-хімічних виробництв в умовах аеротехногенного забруднення довкілля.

Наукові і практичні результати дисертаційної роботи такі:

1. Проведено аналіз сучасних досягнень стосовно вирішення проблеми аеротехногенного забруднення довкілля гірничо-хімічними виробництвами, розташованими на Прикарпатті та у країнах СНД. Серед калійних виробництв Калуського промислового району основними джерелами забруднення є: магнієве виробництво (I клас небезпеки), солевідвали Домбровського кар'єру та виробництва з транспортування та переробки калійних руд (II клас небезпеки).

2. Розроблено методи прогнозування розсіювання шкідливих речовин в атмосферу з врахуванням їх густини, діаметру частинок, швидкості вітру та висоти джерел викиду шляхом математичного моделювання. Зокрема, розрахунки показали, що за швидкості вітру 8 м/с та висоти труби 120 м частинку діаметром  $10^{-4}$  м та густиною  $1,82 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> може віднести на відстань близько 2400 м.

3. Розроблено методіку дослідження рівня забруднення приземного шару атмосфери, використовуючи рівняння Лапласа з крайовими умовами типу Діріхле (задача Діріхле), з подальшою апробацією цієї методіки при визначенні концентрації шкідливих речовин у населених пунктах Калуського промислового району. Результати розрахунків підтвердили достатню ефективність даної методіки.

4. Проведено дослідження поля ризику від точкового джерела небезпеки при неконтрольованих (аварійних) викидах шкідливих речовин та виявлено, що характер розподілу ймовірності потенційної небезпеки має вигляд колового параболоїду.

5. Проведено комплекс експериментальних досліджень аеротехногенного забруднення зони аерації (грунтів та підземних вод) солевідвалами Домбровського кар'єру. Зокрема, проведено лабораторні дослідження процесів молекулярної дифузії солей у глинистих і піщаних ґрунтах та водопроникності глинистих ґрунтів.

Встановлено, що коефіцієнт дифузії солей у глинистих ґрунтах змінюється від 0,18 до 0,28 см<sup>2</sup>/добу, а у піщаних – від 0,40 до 0,59 см<sup>2</sup>/добу. Коефіцієнт фільтрації зростає із збільшенням мінералізації вод з  $(1-9,7) \cdot 10^{-5}$  м/добу у разі фільтрації прісної води до  $(6,1-8,7) \cdot 10^{-4}$  м/добу – у разі фільтрації розчинів з мінералізацією 15 г/дм<sup>3</sup>. Отримані результати дають можливість зробити аналіз екологічного стану ґрунтів залежно від їх гранулометричного складу та мінералізації вод.

6. Одержано розв'язок рівняння балансу маси речовини, розчиненої у підземних водах, методом скінченних різниць, що дозволяє у будь-який момент часу у межах водоносного пласта оперативно визначити мінералізацію вод.

7. Удосконалено метод очищення повітря від пилу та розроблено автоматизовану пилонезшкоджуючу установку на дробильно-сортувальних комплексах з використанням поверхнево-активних речовин (ПАР) з концентрацією у робочому розчині 4-6 %. Висока ефективність знешкодження пилу (до 99 %) досягається при кратності піни 800-1200 об'ємних одиниць. Запропонований нами спосіб очищення повітря від пилу захищений патентом України та буде використаний у процесі реконструкції калійних виробництв ВАТ "Гірхімпром".

## ДОДАТКИ

## Додаток А

Таблиця А.1

Концентрації шкідливих речовин в приземному шарі атмосфери в населених пунктах Калуського району  
при певних метеорологічних параметрах

Дата	Час відбору	Атмосферний тиск, кПа	Температура, °С	Відносна вологість, %	Напрямок вітру	Швидкість вітру, м/с	Cl <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	HCl, мг/м <sup>3</sup>	CO, мг/м <sup>3</sup>	Калійний пил, мг/м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
СІЧЕНЬ										
Кропивник										
3.01	9.00	949	-2,3	85	ЗМ	ЗМ.	0,0001	0,0003	0,2	В
	12.20	950	0,6	76	ПД.ЗХ	2	В	В	0,1	В
	14.10	950	1,0	70	ПД.СХ	3	В	В	0,1	В
Стефанівка										
5.01	9.20	949,7	-2,8	67	ЗМ	ЗМ	В	В	В	12.01
	12.30	947,5	-6,4	63	ЗХ	4	0,008	0,009	0,5	В
	15.40	947	-6,8	60	ЗХ	4	0,006	0,007	0,6	В
Кадобне										
12.01	9.20	960,1	-2,3	93	СХ	2	0,001	0,003	0,1	В
	12.30	961,1	-1,1	93	СХ	2	0,0001	0,0002	0,13	В
	15.40	961,2	0,8	90	СХ	3	0,003	0,004	0,16	В



## Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Завадка										
13.01	9.00	963,4	-7,5	72	пд.сх	7	в	в	в	в
	10.20	963,6	-8,5	86	пд.сх	3	в	в	в	в
	14.40	963,8	-10,2	86	пд.сх	4	в	в	в	в
Кропивник										
17.01	9.00	953,1	-5,8	45	сх	1	0,12	0,24	0,001	в
	12.10	953,5	-3,1	45	сх	1	0,006	0,008	0,002	в
	15.40	953,6	-2	45	сх	2	0,08	0,09	в	в
Томашівці										
26.01	9.00	946,8	4,1	50	пд.сх	в	в	в	в	в
	10.20	946,4	7,1	55	пд.сх	в	в	в	в	в
	12.40	946	8,2	56	пд.	в	в	в	в	в
Негівці										
31.01	9.00	953,4	-4	66	пд.зх	в	в	в	в	в
	11.20	954,1	-3	63	пд.сх	в	в	в	в	в
	14.30	954,2	-1	60	пд.сх	в	в	в	в	в
ЛЮТИЙ										
Томашівці										
1.02	9.00	959,9	-4,2	78	пд.зх	в	в	в	в	в

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.02	11.00	961,1	-1,0	66	пд.зх	в	в	в	в	в
	15.20	961,7	0,2	54	пд.	в	в	в	в	в
Негівці										
2.02	9.20	962,5	0,2	66	пд.зх	1	0,0001	0,0001	в	в
	12.20	962	2,2	58	пд.зх	1	0,0002	0,0002	в	в
	15.00	962	3,4	56	пд.зх	1	в	в	в	в
Мостище										
3.02	9.10	954,7	-1,4	66	пд.зх	1	0,001	0,002	в	в
	12.20	952,1	0,1	58	пд.зх	1	0,002	0,003	в	в
	15.30	952	0	55	пд.	2	в	в	в	в
Кропивник										
7.02	9.00	958,9	-2,1	81	971,8	1	0,005	0,007	0,02	в
	12.20	958,9	-6,3	63	пд.сх	3	0,006	0,006	0,1	0,2
	15.00	958,9	-6	56	пд.сх	3	0,005	0,006	0,2	0,5
Стефанівка										
8.02	9.40	960,9	-7	100	сх	2	0,001	0,002	0,01	в
	9.50	960,9	-7	100	сх	2	0,002	0,003	0,02	в
	11.00	961	-1,1	98	сх	2	0,002	0,003	0,03	в
	12.00	961,4	0,2	98	сх	4	0,006	0,008	0,08	в

## Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	12.30	962	0,2	98	сх	4	0,005	0,009	0,09	в
Збора										
17.02	9.00	971,8	-17,4	89	пд.сх	2	0,0002	0,0004	в	в
	9.20	971,8	-17,4	89	пд.сх	2	0,0002	0,0004	в	в
	11.00	971,5	-15,2	85	пд.сх	2	0,0001	0,0002	в	в
	12.00	971,5	-14,5	80	пд.сх	2	0,0002	0,0003	в	в
	12.20	971,5	-10,0	72	пд.сх	2	0,0002	0,0003	в	в
	13.00	971,0	-9,0	66	пд.сх	2	0,0003	0,0004	в	в
	15.00	971,7	-8,9	64	зм.	3	0,008	0,009	в	в
15.00	971,7	-8,9	64	зм.	3	0,009	0,009	в	в	
16.00	971,7	-8,5	62	зм.	4	0,007	0,008	в	в	
Мостище										
18.02	9.00	966,8	-7,5	82	пд.3х	2	0,001	0,001	в	в
	9.10	966,5	-7,5	82	пд.3х	2	0,002	0,002	в	в
	11.00	966,3	-5,0	70	пд.3х	2	0,001	0,001	в	в
	12.00	966,2	-2,4	68	пд.3х	2	в	в	в	в
	13.00	966	-2,0	68	пд.3х	2	в	в	в	в
	13.20	966	-1,8	65	пд.3х	2	в	в	в	в
	15.00	966	-1,5	66	пд.3х	2	0,008	0,009	0,02	в

Продовження таблиці А.1										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	15.20	966	-1,5	66	пд.зх	2	0,008	0,009	0,02	в
	15.40	966	-1,2	66	пд.зх	2	0,005	0,006	0,1	в
Станькова										
22.02	9.00	961	0,6	100	пд.сх	1	в	в	в	в
	12.00	960,9	5,4	47	пд.сх	2	в	в	в	в
	15.00	960	6	46	пд.сх	3	в	в	в	в
Кепське										
25.02	9.00	953,5	3,4	83	пд.сх	1	0,005	0,006	0,05	в
	9.20	953,5	3,4	83	пд.сх	1	0,006	0,007	0,05	в
	12.10	955	3,4	79	пд.сх	1	0,004	0,006	0,04	в
	15.00	956,5	4,2	77	зм.	2	0,01	0,02	0,2	в
	15.10	956,5	4,2	76	зм.	2	0,01	0,02	0,1	в
	16.00	956,5	4,2	75	зм.	2	0,02	0,03	0,2	в
БЕРЕЗЕНЬ										
Завадка										
2.03	9.00	960,7	3,8	98	сх	2	0,001	0,002	0,2	в
	9.40	960,7	3,8	98	сх	2	0,002	0,003	0,3	в
	11.00	960,6	3,9	98	сх	2	0,001	0,001	0,2	в

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	12.00	960,5	4,8	100	сх	3	0,002	0,002	0,2	В
	12.30	960,5	4,9	100	сх	3	0,001	0,001	0,2	В
	14.00	960	5,2	100	сх	3	0,002	0,002	0,1	В
	15.00	960	5,2	100	сх	2	0,001	0,001	0,1	В
Кропивник										
4.03	9.00	968,8	1,5	94	пд.сх	4	0,008	0,009	0,2	В
	9.20	968,8	1,5	94	пд.сх	4	0,008	0,009	0,2	В
	9.30	968,9	1,6	90	пд.сх	4	0,008	0,009	0,2	В
	12.00	969,3	1,7	82	пд.	3	0,05	0,06	0,1	В
	12.20	969,3	1,7	80	пд.	3	0,04	0,05	0,1	В
	14.00	969,4	1,9	75	пд.сх	3	0,05	0,05	0,1	В
Стефанівка										
00.03	12.00	974,1	4,3	79	сх	3	0,0001	0,0002	В	В
	15.00	974,2	6,4	48	сх	3	0,0004	0,0006	В	В
Стефанівка										
16.03	9.00	948,4	8,1	70	пд.сх	5	0,001	0,001	0,01	В
	9.20	948,4	8,1	70	пд.сх	5	0,002	0,003	В	В
	11.10	950,0	7,2	76	пд.сх	6	0,003	0,004	В	В

## Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	12.00	950,7	5,3	86	пд.	7	0,0001	0,0002	в	в
	12.20	950,7	5,3	86	пд.	7	0,0002	0,0002	в	в
	14.00	951,0	5,3	60	пд.	7,5	0,0003	0,0003	в	в
	15.00	952,5	5,6	55	пд.	8	0,001	0,002	в	в
	15.30	952,5	5,6	55	пд.	8	0,002	0,003	в	в
Негівці										
18.03	9.00	955,9	1,2	53	пд.3х	4	в	в	в	в
	9.30	955,9	1,2	53	пд.3х	4	в	в	в	в
	12.10	957,0	3,5	49	пд.3х	5	в	в	в	в
	12.50	957,0	3,6	49	пд.3х	5	в	в	в	в
	14.50	958,2	1,6	76	пд.3х	3	в	в	в	в
	15.10	958,2	1,6	76	пд.3х	3	в	в	в	в
Збора										
23,03	9.00	971	2,8	45	пд.сх	1	в	в	в	в
	9.10	971	2,8	45	пд.сх	1	в	в	в	в
	11.00	970,9	3,0	45	пд.сх	1	в	в	в	в
	12.00	970,9	3,5	45	пд.сх	1	в	в	в	в
	13.10	970,7	4,5	49	пд.3х	4	в	в	в	в

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	15.10	969,2	4,3	49	пд.зх	4	в	в	в	в
Кельське										
26.03	9.10	943,1	12,9	70	пд.зх	9	0,12	0,13	в	в
	9.20	943,3	12,0	70	пд.зх	9	0,11	0,13	в	в
	12.00	945,5	7,1	94	пд.зх	9	0,14	0,16	в	в
	12.30	945,5	7,1	94	пд.зх	9	0,15	0,15	в	в
КВІТЕНЬ										
Мостище										
5.04	12.00	957,2	13,8	61	пд.зх	4	0,13	0,14	в	в
	12.20	957,2	13,8	61	пд.зх	4	0,11	0,12	в	в
	14.00	957,1	13,9	61	пд.сх	4	0,099	0,01	в	в
	15.00	957,1	13,9	62	пд.сх	4	0,009	0,009	в	в
Кропивник										
6.04	12.00	948,9	5,9	100	пд.сх	5	0,25	0,12	в	в
	12.20	948,9	5,9	100	пд.сх	5	0,27	0,13	в	в
	15.00	947,4	8,0	95	пд.сх	4	0,1	0,1	в	в
	15.20	947,4	8,0	95	пд.сх	4	0,1	0,1	в	в

## Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Кропивник										
7.04	9.00	941,1	3,6	60	сх	5	0,008	0,008	1,2	в
	9.20	941,1	3,6	60	сх	5	0,006	0,007	0,9	в
	12.00	942,4	4,6	84	сх	1	0,09	0,09	в	в
	12.20	942,4	4,6	84	сх	1	0,09	0,09	в	в
Кадобне										
1	9.20	957,0	5,0	100	сх	4	в	в	в	в
	10.00	958,0	5,5	95	сх	4	в	в	в	в
	12.00	958,0	5,5	90	сх	4	в	в	в	в
	2	3	4	5	6	76	8	9	10	11
	15.10	959,1		85	сх	6	в	в	в	в
Копанки										
18.04	9.00	942,3	12,0	69	сх	3	в	в	в	в
	12.20	942,3	12,3	98	пд.зх	6	в	в	в	в
	14.40	942,3	12,5	80	пд.зх	4	в	в	в	в
	15.00	942,4	13,2	64	пд.зх	4	в	в	в	в
Завадка										
21.04	12.00	957,3	10,7	53	пд.сх	5	в	в	в	в
	13.10	956,6	13,6	43	сх	5	в	в	в	в



Продовження таблиці А.1										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	15.20	956,6	13,6	42	сх	5	в	в	в	в
	16.00	956,4	13,3	42	сх	5	в	в	в	в
<b>ТРАВЕНЬ</b>										
<b>Пійло</b>										
4.05	9.20	964,8	12	57	пд.сх	2	в	в	в	в
	10.00	962	8,9	44	пд.сх	4	в	в	в	в
	13.00	962	8,9	44	пд.сх	4	в	в	в	в
<b>Завадка</b>										
6.05	9.40	959,2	12,9	38	пд.сх	3	в	в	в	в
	11.20	959,2	14,3	33	пд.сх	3	в	в	в	в
	14.40	959,2	15,2	32	пд.сх	3	в	в	в	в
<b>Гуменів</b>										
10.05	15.00	958,3	13,7	55	пд.сх	3	в	в	в	в
	15.10	958,9	13,7	48	пд.сх	3	в	в	в	в
<b>Стефанівка</b>										
11.05	9.10	959,2	8,6	84	пд.сх	3	в	в	в	в
	12.40	959,2	9,4	80	пд.сх	3	в	в	в	в
	15.10	959,2	10,0	76	пд.сх	3	в	в	в	в

Продовження таблиці А.1										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Стефанівка										
11.05	9.10	959,2	8,6	84	пд.сх	3	в	в	в	в
	12.40	959,2	9,4	80	пд.сх	3	в	в	в	в
	15.10	959,2	10,0	76	пд.сх	3	в	в	в	в
Стефанівка										
16.05	9.20	958,3	17,8	76	пд.сх	2	в	в	в	в
	10.20	958,3	18,0	80	пд.сх	3	в	в	в	в
	12.00	958,2	18,4	84	пд.сх	3	0,008	0,009	в	в
	15.00	958,1	18,5	88	пд.сх	5	0,009	0,009	в	в
Кропивник										
17.05	10.00	959,3	23,4	41	пд.сх	2	0,18	0,21	0,2	5,022
	11.00	959,2	24,0	40	пд.сх	2	0,11	0,1	0,2	2,0
	12.00	959,2	24,5	40	пд.сх	3	0,09	0,09	0,1	2,2
	14.00	959,2	25,0	40	пд.сх	3	в	в	в	2,0
Пійло										
18.05	12.00	956,5	28,8	26,7	пд.сх	3	в	в	в	в
	12.40	956,0	28,8	27	пд.сх	3	в	в	в	в
	16.00	953,6	28,8	28	пд.сх	3	в	в	в	в

Продовження таблиці А.1										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Томашівці										
23.05	12.10	962,4	20,9	56	пд.зх	3	в	в	в	в
	15.20	960,7	22,2	41	пд.зх	3	в	в	в	в
ЧЕРВЕНЬ										
Мостище										
9.06	9.20	965,3	11,3	91	пд.зх	1	0,002	0,004	0,2	в
	10.40	965,2	11,8	89	пд.зх	1	0,002	0,003	0,1	в
	12.10	964,9	14,6	80	пд.зх	1	0,0001	0,0001	в	в
Верхня										
15.06	9.10	958	17,2	47	пд.	3	0,0002	0,0002	в	в
	12.00	958	17,2	59	пд.	3	0,0002	0,0002	в	в
	13.10	958	18,0	59	пд.	3	0,0001	0,0002	в	в
Кепське										
20.06	9.20	956,2	19,8	64	пд.	2	в	в	в	в
	12.20	956,2	22,8	41	пд.	3	0,18	0,47	в	5,025
	14.40	956,2	24	40	пд.	3	в	в	в	в
Стефанівка										
21.06	12.00	962,9	15,8	46	пд.зх	2	0,0005	0,0006	в	в
	14.10	963,0	16,8	35	пд.зх	2	0,008	0,008	в	в

Продовження таблиці А.1										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Стефанівка										
21.06	12.00	962,9	15,8	46	пд.зх	2	0,0005	0,0006	в	в
	14.10	963,0	16,8	35	пд.зх	2	0,008	0,008	в	в
	15.10	963,4	17,7	35	пд.зх	2	0,009	0,009	в	в
Завадка										
22.06	9.50	965,1	13,5	46	пд.	1	в	в	в	в
	16.00	964,6	18,9	44	пд.сх	1	в	в	в	в
Верхня										
27.06	10.30	966,5	25	45	пд.зх	1	0,0005	0,0004	в	в
	12.20	966,2	27,7	41	пд.зх	1	0,0006	0,0006	в	в
	14.00	966,5	29	40	пд.зх	1	0,0002	0,0002	в	в
Верхня										
29.06	9.20	965.7	21,5	75	пд.сх	1	в	в	в	пд.сх
	12.00	965.3	26,0	5	пд.сх	1	в	в	в	пд.сх
ЛИПЕНЬ										
Кропивник										
7.07	9.20	960,5	21,7	46	пд.сх	2	0,008	0,009	5,4	пд.сх
	13.10	960,5	25,6	46	пд.сх	1	0,008	0,009	0,2	пд.сх

Продовження таблиці А.1										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ЛИПЕНЬ										
Кропивник										
7.07	9.20	960,5	21,7	46	пд.сх	2	0,008	0,009	5,4	пд.сх
	13.10	960,5	25,6	46	пд.сх	1	0,008	0,009	0,2	пд.сх
Кельське										
13.07	9.00	967,9	17	81	пд.сх	2	0,11	0,12	В	В
	11.20	968,1	20,8	69	пд.сх	1	0,1	0,12	В	В
	13.00	969	23	68	пд.сх	1	0,09	0,09	В	В
Завадка										
14.07	9.20	967.1	16,4	83	пд.сх	1	В	В	В	В
	12.20	967.2	21,6	61	пд.сх	1	В	В	В	В
	15.40	967.2	26	52	пд.сх	1	В	В	В	В
Верхня										
15.07	11.00	967,4	18,5	60	пд.сх	1	0,0002	0,0004	В	В
	12.00	967,1	22,3	59	пд.зх	1	0,0001	0,0002	В	В
	13.20	967,0	24,5	52	пд.зх	1	0,0001	0,0002	В	В
	15.00	967,0	26,0	49	пд.зх	1	0,009	0,0001	В	В
Станькова										
18.07	9.40	962,2	18,4	87	пд.	4	0,0002	0,0002	В	В

Продовження таблиці А.1												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	11.20	963	17,8	90	пд.	1	2	0,0001	0,0001	1	1	1
	12.30	963,5	17,5	94	пд.	2	2	0,0002	0,0002	2	2	2
	14.20	963,7	17,2	96	пд.	3	3	0,0003	0,0003	3	3	3
Станькова												
18.07	9.40	962,2	18,4	87	пд.	4	4	0,0002	0,0002	4	4	4
	11.20	963	17,8	90	пд.	2	2	0,0001	0,0001	2	2	2
	12.30	963,5	17,5	94	пд.	2	2	0,0002	0,0002	2	2	2
	14.20	963,7	17,2	96	пд.	3	3	0,0003	0,0003	3	3	3
Пійло												
21.07	12.00	963,7	23	51	пд.сх	2	2	1	1	2	2	2
	13.20	963,6	24	46	пд.сх	2	2	1	1	2	2	2
	14.20	963,5	24,6	43	пд.сх	2	2	1	1	2	2	2
	15.10	963,5	24,8	42	пд.сх	2	2	1	1	2	2	2
Кропивник												
25.07	11.10	964	23,8	39	сх	2	2	0,009	0,009	2	2	2
	12.30	964	24	39	сх	2	2	0,008	0,008	2	2	2
	14.20	964	26	38	сх	3	3	0,09	0,09	3	3	3

Продовження таблиці А.1										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
СЕРПЕНЬ										
Верхня										
1.08	12.00	961,3	28,5	35	сх	3	в	в	в	в
	13.00	961,3	29	35	сх	3	в	в	в	в
	15.20	961,3	29,3	35	сх	3	в	в	в	в
Верхня										
2.08	12.20	962,3	28,2	36	пд.	2	0,09	0,09	в	в
	13.40	962,3	30,0	34	пд.	3	0,08	0,08	в	в
	15.20	962,3	30,4	34	пд.	3	0,0005	0,0005	в	в
Гуменів										
4.08	12.20	966,2	18,9	88	пд.	2	в	в	в	в
	13.20	966,2	19,8	75	пд.	2	в	в	в	в
	15.00	966	22	64	пд.	2	в	в	в	в
Станькова										
9.08	12.20	966,5	21,6	71	пд.	1	в	в	в	в
	13.20	960,2	22,8	53	зм.	1	в	в	в	в
	15.00	959,6	27,5	50	зм.	1	в	в	в	в
Кропивник										
11.08	9.10	953,4	17,1	84	сх	1	0,11	0,12	в	в

Продовження таблиці А.1										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Кропивник										
11.08	10.10	952	18,5	50	сх	2	0,12	0,13	в	в
	12.00	951	22,2	45	пд.сх	2	0,11	0,22	0,1	5,08
	13.10	950	30,0	45	пд.сх	2	0,15	0,26	в	5,1
Кепське										
15.08	9.10	956,4	15,8	82	зм.	3	0,15	0,15	в	в
	12.30	956,7	17,6	70	пд.зх	3	0,18	0,18	в	в
	13.20	956,7	19,0	65	пд.зх	2	0,09	0,15	в	в
Стефанівка										
16.08	9.40	965,4	15,8	82	пд.сх	1	0,13	0,11	в	в
	12.10	967,1	17,1	63	пд.сх	3	0,1	0,2	в	в
	15.40	967,2	25	42	пд.сх	5	0,08	0,09	в	в
Кропивник										
18.08	12.00	954,2	22,9	46	пд.сх	1	0,095	0,096	в	5,2
	14.00	951,8	24,4	36	пд.сх	1	0,008	0,009	в	5,1
	15.00	951,9	25	36	пд.сх	1	0,009	0,009	в	4,2
Станькова										
23.08	12.20	965	18,7	57	пд.	1	0,08	0,09	в	в
	14.30	964,1	20,6	45	пд.	1	0,05	0,07	в	в



Продовження таблиці А.1										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	15.10	964	21,0	42	пд.	1	0,02	0,04	в	в
Томашівці										
29.08	12.10	963,4	15,3	83	пд.зх	1	в	в	в	в
	14.10	963,4	17,7	78	пд.зх	1	в	в	в	в
	14.00	963,6	19,4	57	пд.зх	1	в	в	в	в
Копанки										
30.08	9.20	963,4	19,4	47	пд.зх	3	0,11	0,22	в	в
	11.00	963,4	25,2	44	пд.зх	3	0,10	0,22	в	в
	14.00	963,6	27,5	41	пд.зх	2	0,09	0,11	в	в
ВЕРЕСЕНЬ										
Завадка										
11.09	9.20	953,4	17,1	84	сх	1	0,001	0,002	в	в
	12.10	950	30,1	50	сх	1	0,002	0,003	в	в
	15.10	950	32,5	45	сх	1	в	в	в	в
Кепське										
15.09	12.00	956,4	15,8	82	сх	1	в	в	в	в
	14.00	956,7	17,6	70	сх	1	в	в	в	в
Кепське										
16.09	10.00	965,4	13,2	82	пд.	2	0,16	0,28	в	в

Продовження таблиці А.1												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	15.20	961,8	24,4	46	пд.	2	0,009	0,01	в	1	в	в
Кепське												
18.09	12.00	954,2	22,9	46	пд.зх	3	0,15	0,22	1,2	1,2	5,2	5,2
	15.00	955	25	43	пд.зх	3	0,008	0,08	1,0	1,0	5,3	5,3
Кропивник												
23.09	12.10	965	18,7	45	пд.сх	4	0,18	0,26	0,2	0,2	5,4	5,4
	15.00	964,1	20,6	43	пд.сх	4	0,12	0,12	0,2	0,2	в	в

Примітка: в – відсутність шкідливих інгредієнтів.

## Додаток Б

Таблиця Б.1

**Результати замірів концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі у населених пунктах Калуського району**

Дата	Назва села	Вологість, %	Напрямок вітру	Швид- кість, м/сек	Cl <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	HCl, мг/м <sup>3</sup>	Калійний пил, мг/м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
17.01	Кропивник	45	сх.	1	0,02	0,04	0,2
26.03	Кепське	70	пд.зх	9	0,02		
		70	пд.зх	9	0,01		
		94	пд.зх	9	0,04		
		94	пд.зх	9	0,05		
5.04	Мостище	61	пд.зх	4	0,03		
		61	пд.зх	4	0,01		
6.04	Кропивник	100	пд.сх	5	0,15		
		100	пд.сх	5	0,17		
17.06	Кропивник	41	пд.сх	2	0,08	0,01	0,022
		40	пд.сх	2	0,01		
20.06	Кепське	41	пд.	3	0,08	0,27	0,025
7.07	Кропивник	46	пд.сх	2			0,4
18.07	Кепське	81	пд.зх	2	0,01		
11.8	Кропивник	84	сх	1	0,01		
		50	сх	2	0,02		
		45	пд.сх	2	0,01	0,02	0,08
		45	пд.сх	2	0,05	0,08	0,1
15.08	Кепське	82	зм.	3	0,05		
		70	пд.зх	3	0,08		
16.08	Стефанівка	82	пд.сх	3	0,03		

Продовження таблиці Б.1							
1	2	3	4	5	6	7	8
30.08	Копанки	47	пд.зх	3	0,01	0,02	
		44	пд.зх	3		0,02	
16.09	Копанки	82	пд.	2	0,06	0,08	
18.09	Кепське	46	пд.зх	3	0,05	0,02	0,2
		43	пд.зх	3			0,3
23.09	Кропивник	45	пд.сх	4	0,08	0,05	0,4

## Додаток В

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова правління інституту  
гірничо-хімічної промисловості  
ВАТ "Гірхімпром", к.т.н.



Ми, що нижче підписані, представники інституту гірничо-хімічної промисловості ВАТ "Гірхімпром", заступник директора Гелетій Г.М., головний інженер Ковалишин В.В. та асистент кафедри "Безпеки життєдіяльності" Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу Камаєва І.О., склали цей акт, який підтверджує, що ВАТ "Гірхімпром" використовує наукові розробки Камаєвої І.О. при реконструкції калійних виробництв Калуського ВАТ "Оріана" та Стебницького Державного гірничо-хімічного підприємства "Полімінерал", а саме:

1. Спосіб очищення повітря від пилу при транспортуванні, дробленні та сортуванні калійних руд.
2. Методику розрахунків при знятті аеродинамічних вимірів при відборі пилу у газоочисних та аспіраційних системах фабрики грануляції мінеральних добрив.

Гелетій Г.М.

Ковалишин В.В.

Камаєва І.О.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Кулиш Е. А. Главные тенденции в современной минерально-сырьевой базе Мира / Е. И. Кулиш, В. Н. Воеводин // Регион – 2003: стратегія оптимального розвитку : Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 2003 р. : тези доп. – Х., 2003. – С. 25-26.
2. Міщенко В. С. Економічні аспекти розвитку мінерально-сировинної бази України / В. С. Міщенко // Геолог України. – 2004. – № 1. – С. 8-12.
3. Гальперин В. И. Защита атмосферы от пылегазовых выбросов горно-химических предприятий / В. И. Гальперин – М. : Недра, 1984. – 117 с.
4. Екологія гірничого виробництва : навч. посіб. / [П. Б. Бересневич, Ю. Г. Вілкун, О. М. Голишев та ін.]. – Кривий Ріг : Мінерал, 1998. – 152 с.
5. Современные проблемы и факторы развития минерально-сырьевого комплекса Украины / Н. М. Гавриленко, Е. А. Кулиш, А. И. Зарицкий, В. С. Мищенко ; АН Украины, Госгеолком Украины. – К., 1993. – 122 с. – (Минеральные ресурсы Украины).
6. Мищенко В. С. Минерально-сырьевой комплекс Украинской ССР / В. С. Мищенко – К. : Наук. думка, 1987. – 232 с.
7. Шапарь А. Г. Проблемы рационального природопользования и комплексного освоения недр / А. Г. Шапарь // Сб. науч. тр. / НГА Украины. – Днепропетровск, 1998. – Т.1, № 3. – С. 38-45.
8. Волкова К. В. Екологічна небезпека вугільної промисловості / К. В. Волкова, Т. П. Волкова // Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів : зб. доп. / Донец. нац. техн. ун-т. – Донецьк, 2005. – Т.2. – С. 134-135.
9. Адаменко О. М. Управління природними ресурсами та екологічна безпека в паливно-енергетичному комплексі Карпатського регіону / О. М. Адаменко // Наук. вісн. Івано-Франків. нац. техн. ун-ту нафти і газу. – 2002. – № 2(3). – С. 140-144.

10. Адаменко О. М. Екологічна геологія : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / О. М. Адаменко, Г. І. Рудько. – К. : Манускрипт, 1997. – 348 с.
11. Бочеввер Ф. М. Защита подземных вод от загрязнения / Ф. М. Бочеввер, Н. М. Лопшин, А. Е. Орадовская – М. : Недра, 1979. – 254 с.
12. Бочеввер Ф. М. Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнений / Ф. М. Бочеввер, А. Е. Орадовская. – М. : Недра, 1972. – 129 с.
13. Гольдберг В. М. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения / В. М. Гольдберг, С. Газда. – М. : Недра, 1984. – 262 с.
14. Мироненко В. А. Опытнo-миграционные работы в водных пластах / В. А. Мироненко, В. Г. Румынин. – М. : Недра, 1986. – 238 с.
15. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах / [В. А. Мироненко, Е. В. Мольский и др.]. – М. : Недра, 1988. – 279 с.
16. Лялько В. Н. Методы расчета тепло- и массопереноса в земной коре / В. Н. Лялько – К. : Наук. думка, 1974. – 132 с.
17. Рудько Г. І. Екологічна безпека та раціональне природокористування в межах гірничопромислових і нафтогазових комплексів (наук. і методолог. основи) : [монографія] / Г. І. Рудько, Л. Є. Шкіца ; М-во освіти та науки України, Івано-Франків. держ. техн. ун-т нафти і газу, НАН України, Ін-т геолог. наук. – К. : Нічлава, 2001. – 528 с. : іл. – ISBN 966–7327–66–3.
18. Рудько Г. И. Оценка техногенных изменений геологической среды и вопросы управляемого контроля техногенеза : (на примере Карпат. региона Украины) / Г. И. Рудько // Геоэкология. – 1999. – № 2. – С. 15-25.
19. Шестаков В. М. Динамика подземных вод / Шестаков В. М. – М. : Изд-во МГУ, 1973. – 327 с.
20. Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов при фильтрации из хранилищ промышленных стоков / В. М. Шестаков – М. : ВНИИВОДГЕО, 1981. – 101 с.
21. Шестопалов В. М. Проблемы охраны геологической среды в районах интенсивного развития горнодобывающей промышленности Украинской

- ССР / Шестоपालов В. М., Корженевский Б. А., Семчук Я. М. – К.: 1988. – 59 с. – (Препринт / АН УССР. Ин-т геолог. наук ; 88-40).
22. Липницкий В. К. Гидрогеологические условия разработки участка «Пийло» Калуш-Голынского месторождения калийных солей / В. К. Липницкий, Я. М. Семчук // Гидрогеология и охрана недр при разработке соляных месторождений / ВНИИГ. – Л., 1986. – С. 21-29.
23. Липницкий В. К. Подземный сброс промышленных стоков калийных предприятий / В. К. Липницкий, В. Н. Трофинов // Экологические проблемы районов деятельности калийных предприятий / ВНИИГ. – Л., 1989. – С. 115-125.
24. Бельтюков Г. В. Методические вопросы изучения соляного карста : (на примере месторождений Предуралья) : обзор. информ. / Г. В. Бельтюков ; МГП «Геоинформмарк». – М. : Геоинформмарк, 1992. – 82 с. – (Серия : Гидрогеология, инженерная геология ; вып. 5).
25. Рудько Г. І., Шкіца Л. Є. Техногенно-екологічна безпека солевидобувних гірничопромислових комплексів Передкарпаття / Г. І. Рудько, Л. Є. Шкіца // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2001. – № 5-6. – С. 68-71.
26. Семчук Я. М. Вплив відходів калійних підприємств на гідрохімічний режим ґрунтових вод / Я. М. Семчук // Хім. пром-сть України. – 1995. – № 2 – С. 81-83.
27. Семчук Я. М., Малишевська О. С. Дослідження процесів розчинення та вилуговування соляних порід для оцінки наслідків затоплених калійних шахт / Я. М.Семчук, О. С.Малишевська // Хім. пром-сть України. – 2002. – № 1. – С. 9-12.
28. Семчук Я. М. Наукові та методичні основи охорони геологічного середовища в районах розробки калійних родовищ : (на прикладі Передкарпаття) : дис. ... доктора техн. наук : 20. 03. 95 / Семчук Ярослав Михайлович. – Івано-Франківськ, 1995. – 355 с.



29. Гаркушин П. К. Техногенез і охорона навколишнього середовища при розробці калійних родовищ Передкарпаття / П. К. Гаркушин // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2001. – № 2. – С. 48-55.
30. Кузьменко Е. Д. Комплекс геофізичних методів прогнозування розвитку соляного карсту в Передкарпатті / Е. Д. Кузьменко, С. М. Багрій, О. П. Вдовіна // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т.Шевченка. “Геологія”. – 2003. – Вип. 26-27. – С. 43-50.
31. Шкіца Л. Є. Методика прогнозування формування ареалу забруднень шкідливими витоками з сховищ / Л. Є. Шкіца // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 1(6). – С. 116-118.
32. Шкіца Л. Є. Методологія геоекологічного аналізу гірничопромислових комплексів / Л. Є. Шкіца // Экотехнология и ресурсосбережение. – 2005. – № 1. – С. 53-55.
33. Шлендова Т. К. Загрязнение геологической среды в районах деятельности предприятий Соликамско-Березниковского и Солегорского промрайонов / Т. К. Шлендова // Охрана геологической среды на калийных месторождениях / ВНИИГ. – Л., 1996. – С. 18-25.
34. Мустель И. П. Воздействие шахтной разработки на геологическую среду калийных месторождений / И. П. Мустель // Охрана геологической среды на калийных месторождениях / ВНИИГ. – Л., 1986. – С. 12-17.
35. Клементьев В. П. Изменение естественной обстановки под влиянием оседания земной поверхности при отработке Старобинского месторождения калийных солей / В. П. Клементьев, К. А. Степанов // Охрана окружающей среды калийных производств. – Минск, 1988. – С. 60-65.
36. Степанов К. А. Изменение деформаций земной поверхности краевых частей мульд сдвижения во времени / К. А. Степанов // Сдвигание земной поверхности и толщи на калийных месторождениях / ВНИИГ. – Л., 1987. – С. 14-21.

37. Развитие калийной промышленности. Калийная промышленность Франции. Обзорная информация. – Л.: ВНИИГалургии. – 1981. – № 4 – 27с.
38. Рыжиков А. П. Авария на Стебниковском хвостохранилище / А. П. Рыжиков // Энергия, экономика, техника, экология. – 1983. – № 4 – С. 53-54.
39. Зависимости для определения концентраций примесей в атмосфере у отдельно стоящего здания при действии точечных источников / В. С. Никитин, В. Т. Самсонов, Н. Г. Максимкина, Л. В. Плотникова // Науч. работы ин-тов охраны труда ВЦСПС / ВЦНИИ охраны труда. – М., 1975. – Вып. 97. – С. 11-17.
40. Визначення впливу дії калійних підприємств Прикарпаття на навколишнє середовище для розробки заходів по його охороні. Аналіз викидів відходів підприємств в повітряний басейн : [заключ. звіт по договору № 60/14, Калуш, етап 2 / кер. В. Г. Горлова]. – Калуш, ДНДІГ, 1994. – 38 с.
41. Harker J.K. The effect of additives of the E.P. / J. K. Harker, T. S. Taha // Environmental Pollution Management. – 1979. – January. – 74 p. – England.
42. Охрана окружающей среды / [под ред. С. В. Белова]. – М. : Высш. Шк., 1991. – 320 с.
43. Седов Л. М. Методы подобия и размерность в механике / Л. М. Седов – М. : Физматгиз, 1972. – 440 с.
44. Колгоморов А. Н. / Колгоморов А. Н. // ДАНССС. – 1941. – Т.31, № 6. – С. 538-541.
45. Обухов А. Н. / Обухов А. Н. // Изд. АН ССР. Сер. Географ. и геофиз. – 1941. – № 4-5. – С. 512-522.
46. Лойцянский Л. Г. Механика жидкостей газов / Л. Г. Лойцянский – М. : Наука, 1973. – 906 с.

47. Эльтерман В. М. Охрана воздушной среды на химических и нефтехимических предприятиях / В. М. Эльтерман – М. : Химия, 1985. – 160 с.
48. Бруязцкий В. В. Турбулентные стратифицированные струйные течения / В. В. Бруязцкий – К. : Наук. думка, 1986. – 170 с.
49. Самарский А. А. Численные методы решения задач конвекции – диффузии / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М. : Эдитория УРСС, 1999. – 248 с.
50. Самарский А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. – М. : Наука, 1987. – 588 с.
51. Бызова Н. Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеивания примеси / Н. Л. Бызова, Е. К. Гаргер, В. Н. Иванов. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 280 с.
52. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
53. Хинце И. О. Турбулентность, ее механизм и теория / И. О. Хинце. – М. : Физматгизд, 1963. – 680 с.
54. Хинкли Э. Д. Лазерный контроль атмосферы / Э. Д. Хинкли. – М. : Мир, 1979. – 416 с.
55. Браун Дж. В. Методы Монте-Карло / Дж. В. Браун // Современная математика для инженеров / под ред. Э. Р. Беккенбаха. – М., 1958. – С. 275-304.
56. Гельфонд А. О. Исчисление конечных разностей / А. О. Гельфонд. – М. : Наука, 1967. – 340 с.
57. Гнеденко Б. В. Из истории науки о случайном / Б. В. Гнеденко. – М. : Знание, 1981. – 64 с.
58. Біогеохімічний моніторинг аеротехногенного забруднення екосистеми Карпатського регіону / І. М. Смоленський, Н. Є. Котюшко, В. В. Клід, І.

- О. Камаєва, В. М. Случик, Я. Є. Штиркало, І. Й. Случик // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2004. – №6 (24). – С. 70-77.
59. Демидович Б. П. Численные методы анализа / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. – М. : Наука, 1967. – 368 с.
60. Екоаналітична діагностика АТЗ на території впливу небезпечних об'єктів біогеохімічними методами / І. М. Смоленський, Н. Є. Котюшко, Г. П. Зоріна, В. В. Клід, І. О. Камаєва // Екологічні проблеми нафтогазового комплексу : Наук.-практ. конф., Київ, 23-27 лют. 2003 р. : тези доп. – К., 2003. – С. 126-129.
61. Кошляков Н. С. Основные дифференциальные уравнения математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. – М. : Изд-во физ.-мат. л-ры, 1982. – 768 с.
62. Крылов В. И. Вычислительные методы: в 2 т / В. И. Крылов, В. В. Бобков, П. И. Монастыский. – М. : Наука, 1976. – 1977. – Т. 1. – 304 с. ; Т. 2. – 400 с.
63. Курант Р. О разностных уравнениях математической физики / Р. Курант, К. Фридрикс, Г. Леви // Успехи математических наук. – 1940. – Вып. 8. – С. 125-160.
64. Смоленський І. Концепція ІХМ АТЗ та техногенно-екологічна безпека теплоенергетичного комплексу / І. Смоленський, Г. Зоріна, І. Камаєва // Тези науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу університету, ІФДТУНГ, 2000 р. – Івано-Франківськ, 2000. – С. 87-88.
65. Хорват Л. Кислотный дождь / Л. Хорват ; пер. с венг. В. В. Крымского; под ред. Ю. Н. Михайловского. – М. : Стройиздат, 1990. – 80 с.
66. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / [перевод с англ.]. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 351 с.
67. Семчук Я. М. Влияние разработки калийных солей в Домбровском карьере на окружающую среду / Я. М. Семчук. – М., 1980. – 17 с. – Деп. в ЦНИИТЭИПищепром 02. 10. 80, № 1365.

68. Семчук Я. М. Исследование влияния природных и техногенных факторов на формирование химического состава грунтовых вод Калуш-Голынского месторождения калийных солей / Я. М. Семчук // Эвапориты Украины : сб. науч. тр. / АН УССР, ин-т геологии и геохимии горючих ископаемых. – К. : Наук. думка, 1985. – С. 143-151.
69. Семчук Я. М. Техногенне порушення геологічного середовища у районах розробки калійних родовищ / Я. М. Семчук // Уголь Украины. – 2001. – № 9 (537). – С. 41-45.
70. Семчук Я. М. Екологічні проблеми при відкритій розробці калійних солей у Прикарпатті / Я. М. Семчук, Л. Є. Шкіца // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2004. – № 2. – С. 52-56.
71. Математична модель розсіювання викидів промислових підприємств / І. О. Камаєва, Я. М. Семчук, Л. І. Камаєва, О. М. Лев // Вест. Херсон. нац. техн. ун-та. – 2005. – Вып. 2(22). – С. 143-147.
72. Семчук Я. М. Математична модель розсіювання шкідливих речовин у приземному шарі атмосфери / Я. М. Семчук, І. О. Камаєва // Вест. Херсон. гос. техн. ун-та. – 1999. – Спец. вып.: Прикладные проблемы математического моделирования. – С. 155-158.
73. Модель розповсюдження шкідливих речовин внаслідок вітрової ерозії / І. О. Камаєва, Я. М. Семчук, Л. І. Камаєва, О. М. Лев // Вест. Херсон. нац. техн. ун-та. – 2007. – Вып. 2(28). – С. 131-136.
74. Камаєва І. О. Математична модель дослідження поля концентрації забрудненості при наявності джерела викидів / І. О. Камаєва, Я. М. Семчук // Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів : IX Всеукр. студ. наук. конф., Донецьк, 13-15 квіт. 1999 р. : тез. доп. – Донецьк, 1999. – С. 274-275.
75. Камаєва І. О. Задачі Діріхле в екологічних дослідженнях / І. О. Камаєва, Л. І. Камаєва, Я. М. Семчук // Тези науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу університету, ІФДТУНГ, 2000 р. – Івано-Франківськ, 2000. – С. 92-93.

76. Камаєва І.О. Моделювання вітрової ерозії солевідвалів Домбровського кар'єру / І. О. Камаєва, Я. М. Семчук, Л. І. Камаєва // Наук. вісті ІМЕ «Галицька академія». – 2006. – Вип. 2(10). – С. 122–127.
77. Константинов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу : підручник / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – К. : Вища шк., 2002. – 277 с.
78. Аеротехногенні та біоіндикаційні дослідження антропогенного впливу Калуської ТЕЦ та хлорнебезпечних виробництв концерну «Оріана» в контексті сталого розвитку регіону / І. Смоленський, Я. Штиркало, Г. Зоріна, І. Камаєва. // Галицька земля: історія та сучасність : наук. конф., Івано-Франківськ, 1998 р. : тези доп. – Івано-Франківськ, 1998. – С. 116-117.
79. Смоленський І. М. ОВНС теплоенергетичного комплексу в районі господарської діяльності екологічно-небезпечних виробництв / І. М. Смоленський, І. О. Камаєва, В. В. Клід. // Нафта і газ України : VII Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 31 жовт. - 1 листоп. 2002 р. : матеріали. – К., 2002. – Т. 2. – С. 381-383.
80. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. – Л. : Гидрометеоиздат, 1987. – 94 с.
81. Заиков Г. Е. Диффузия – помощник и недруг / Г. Е. Заиков, А. Л. Иорданский // Новое в жизни, науке, технике. Сер. Химия. – М. : Знание, 1982. – № 10. – 64 с.
82. Николаи Е. Л. Теоретическая механика / Е. Л. Николаи. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. л-ры, 1958. – 484 с.
83. Камаєва І. О. Методика визначення концентрації шкідливих речовин забрудненої території / І. О. Камаєва, Я. М. Семчук // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – №9. – С. 72-75.
84. Камаєва І. О. Апробація методики по визначенню концентрації шкідливих речовин забрудненої території / І. О. Камаєва, Л. І. Камаєва, Я. М. Семчук // Тези науково-технічної конференції професорсько-

- викладацького складу університету, ІФНТУНГ, 2002 р. – Івано-Франківськ, 2002. – С. 30–31.
85. Семчук Я. М. Методика з визначення рівня забрудненості приземного шару атмосфери / Я. М. Семчук, І. О. Камаєва // Наука і освіта –99 : II Міжнар. наук.-практ. конф., Дніпропетровськ, 15-30 січ. 1999 р. : тез. доп. – Дніпропетровськ, 1999. – Т.3. – С. 45-46.
86. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.
87. Методологія імпактного хімічного моніторингу в контексті техногенної безпеки теплоенергетичного комплексу / І. Смоленський, Г. Зоріна, В. Клід, І. Камаєва, О. Гевка // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ: держ. міжвід. наук.-техн. зб. / Івано-Франк. держ. техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2000. – С. 73-78. – (Серія : Енергетика ; вип. 37, т. 9).
88. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики / С. М. Тарг. – М. : Высш. шк., 1986. – 416 с.
89. Соболев И. М. Метод Монте-Карло / И. М. Соболев. – М. : Наука, 1985. – 80 с.
90. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло / И. М. Соболев. – М. : Наука, 1978. – 230 с.
91. Сабельфельд К. К. Методы Монте-Карло в краевых задачах / К. К. Сабельфельд. – Новосибирск : Наука, 1989. – 280 с.
92. Тихонов А. М. Уравнения математической физики / А. М. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1966. – 724 с.
93. Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров / С. Фарлоу. – М. : Мир, 1985. – 324 с.
94. Филин А. П. Прикладная механика твердого деформируемого тела : в 3 т. / А. П. Филин. – М. : Наука, 1978. – Т. 2. – 616 с.
95. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ : практич. рук. / Т. Шуп. – М. : Мир, 1982. – 238 с.

96. Кострюкова І. О. (Камаєва І.О.) Дискретні моделі в екологічних дослідженнях / І. О. Кострюкова (І. О. Камаєва), Л. І. Камаєва, Т. Г. Лавінюкова; Івано-Франк. держ. техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 1998. – 6 с. – Деп. в ДНТБ України 20.07.1998, № 332 – Ук. 98.
97. Камаєва І. О. Чисельний аналіз забрудненості території в результаті промислових викидів / І. О. Камаєва // Методи та прилади контролю якості. – 2000. – № 5. – С. 62-63.
98. Камаєва І. О. Моделювання динаміки розповсюдження шкідливих речовин на межі системи «повітря–грунт» / І. О. Камаєва, Я. М. Семчук, Л. І. Камаєва // Вест. Херсон. нац. техн. ун-та. – 2008. – Вып. 2(31). – С. 212-215.
99. Камаєва І. О. Методика побудови поля ризику / І. О. Камаєва, Я. М. Семчук // Тези науково–технічної конференції професорсько–викладацького складу університету, ІФНТУНГ, 2001 р. – Івано-Франківськ, 2001. – С. 163.
100. Камаєва І. О. Побудова поля ризику від точкового джерела небезпеки / І. О. Камаєва, Я. М. Семчук, Л. І. Камаєва // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. – №4. – С. 191-192.
101. Сафонов В. С. Теория и практика в газовой промышленности / В. С. Сафонов, Г. Э. Одишария, Н. А. Швириев. – М. : Олита, 1996. – 208 с.
102. Кушелев В. П. Охрана природы от загрязнений промышленными выбросами / В. П. Кушелев. – М. : Химия, 1979. – 156 с.
103. Беспмятнов Г. П. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде / Г. П. Беспмятнов, Ю. Л. Кратов. – Л. : Химия, 1985. – 92 с.



104. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – Введ. 1976 – 03 – 05. – М. : Госстандарт СРСР, 1976. – 30 с.
105. Экологическая химия / под ред. Ф. Корже ; пер. с нем. – М. : Мир, 1997. – 396 с.
106. Хида Т. Броуновское движение / Т. Хида. – М. : Наука, 1987. – 160 с.
107. Алексеенко Е. Я. О прогнозе засоления поверхностных и подземных вод отходами калийных производств / Е. Я. Алексеенко, Е. Е. Керкис // Гидрогеология и охрана недр при разработке соляных месторождений. – Л., 1976. – С. 58-67. – (Труды / ВНИИГ ; вып. 1).
108. Семчук Я. М. Дослідження дифузійного переміщення хлоридів в алювіальних суглинках у районі калійних підприємств концерну «Оріана» / Я. М. Семчук, І. О. Камаєва // Тези науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу університету, ІФДТУНГ, 2000 р. – Івано-Франківськ, 2000. – С. 91-92.
109. Орадовская А. Е. Некоторые экспериментальные данные о коэффициенте диффузии (дисперсии) в горных породах / А. Е. Орадовская // Инженерная гидрогеология. – М., 1969. – Вып. 22. – С. 99-102.
110. Затенацкая Н. П. Поровые воды глинистых пород и их роль в формировании подземных вод / Н. П. Затенацкая. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1963. – 142 с.
111. Гоулдстейн Дж. Практическая растровая электронная микроскопия / Дж. Гоулдстейн, Х. Яковиц ; пер. с англ. – М. : 1998. – 644 с.
112. Гольдберг В. М. Проницаемость и фильтрация в глинах / В. М. Гольдберг, Н. П. Скворцов. – М. : Недра, 1986. – 160 с.
113. Семчук Я. М. Исследование проницаемости глинистых грунтов для устройства экранов под солеотвалы, хвостохранилища на калийных производствах Предкарпатья / Я. М. Семчук // Калийная

- промышленность СССР и окружающая среда. : сборник. – Минск, 1983. – С. 127-131.
114. Баренблатт Г. И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г. И. Баренблатт, В. М. Ентов, В. М. Рыжик. – М. : Недра, 1984. – 208 с.
115. Бойко В. С. Підземна гідромеханіка : навч. посіб. / В. С. Бойко. – К. : ІСДО, 1995. – 288 с.
116. Павилонский В. М. Изменение проницаемости глинистого экрана при длительной фильтрации кислых стоков / В. М. Павилонский // Гидрогеологические исследования водозаборных, водопонижающих и дренажных систем. – М., 1990. – С. 72-81.
117. Білоус Л. І. Елементи моніторингу в геологічних та агроґрунтових дослідженнях / Л. І. Білоус, І. М. Волошин // Моніторинг природних комплексів. – Львів, 1995. – С. 37-50.
118. Білявський Г. О. Практикум із загальної екології. : навч. посіб. / Г. О. Білявський, Р. С. Фурдуй. – К. : Либідь, 1997. – 160 с.
119. Еколого-геохімічна оцінка забруднення ґрунтів, донних відкладів, ґрунтових вод : метод. рекомендації ДПП «Геоінформ». – К. : Геоінформ, 1998. – 33 с.
120. Камаєва І.О. Аеротехногенне забруднення зони аерації від промислових підприємств м. Калуша / І. О. Камаєва, Я. М. Семчук // Україна наукова – 2003 : Міжнар. наук.–практ. конф., Дніпропетровськ, 16-20 черв. 2003 р. : тези доп. – Дніпропетровськ, 2003. – Т. 15 : Екологія. – С. 11-12.
121. Камаєва І. О. Основні джерела забруднення підземних вод у Калуському промисловому районі / Камаєва І. О, Семчук Я. М. // Безпека життєдіяльності : Наук.-метод. конф., Харків, 27-28 лист. 2002 р. : тези доп. – Харків, 2002. – С. 67-69.
122. Математична модель міграції речовини у підземних водах / І. О. Камаєва, Я. М. Семчук, Л. І. Камаєва, О. М. Лев // Вест. Херсон. нац. техн. ун-та. – 2006. – Вып. 25. – С. 217-221.

123. Бочеввер Ф. М. Защита подземных вод от загрязнения / Ф. М. Бочеввер, Н. М. Лапшин, А. Е. Орадовская. – М. : Недра, 1979. – 254 с.
124. Семчук Я. М. Изучение миграции высокоминерализованных рассолов в районе хвостохранилища Калушского производственного объединения «Хлорвинил» на физической модели / Я. М. Семчук // Совершенствование технологии добычи и переработки калийных руд Прикарпатья : сборник. – Черкассы : ОН ТЭХИМ, № 952ХІІ-Д84, 1985. – С. 86-95.
125. Семчук Я. М. Исследование процессов засоления подземных вод рассолами сложного состава на калийных предприятиях Предкарпатья / Я. М. Семчук, С. С. Корень // Охрана экологической среды на калийных месторождениях : сборник / ВНИИ. – М. : ВНИИ, 1985. – С. 48-52.
126. Грабовников В. А. Формирование и строение ореолов рассеяния в подземных водах / В. А. Грабовников, В. З. Рубейкин, Л. Н. Самсонова. – М. : Недра, 1977. – 136 с.
127. Коржинский Д. С. // Изв. АН СССР. Отделение математики и естеств. наук : серия геологическая. – 1947. – № 2. – С. 17-21.
128. Голубев В. С. Гетерогенные процессы геохимической миграции / В. С. Голубев, А. А. Габриянец. – М. : Недра, 1968. – 240 с.
129. Жариков В. А. Офильтрационном эффекте в растворах электролитов / В. А. Жариков, Т. Н. Дюжинова, Э. М. Максакова // Изд. АН СРСР. Серия геологическая. – 1963, № 10. – С. 81-91.
130. Камаєва І. О. Дослідження процесів засолення ґрунтових вод в районах впливу калійних виробництв / І. О. Камаєва, Я. М. Семчук // Хім. пром-сть України. – 2001. – №6. – С. 10-12.
131. Семчук Я.М. Особливості формування сольового забруднення в підземних водах у районах розміщення калійних підприємств / Я. М. Семчук, І. О. Камаєва // Наук. вісн. Івано–Франків. нац. техн. ун-ту нафти і газу. – 2000. – № 2. – С. 131-136.

132. Правила технической эксплуатации и безопасного обслуживания газопылеулавливающих установок // Охрана окружающей среды : справочник. – Л. : Судостроение, 1988. – 96 с.
133. Пат. України на корисну модель, МПК Е 21 F 5/06. Спосіб очищення повітря від пилу / Семчук Я. М., Камаєва І. О. ; заявник та патентовласник Івано-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу. – № 21750 ; заявл. 26.01.07 ; опубл. 15.03.07, Бюл. № 3. – 4 с.
134. Санитарные правила по охране атмосферного воздуха населенных мест. – Сан.ПиН.-М. : Минздрав СССР, 1989. – 50 с.
135. Кушелев В. П. Охрана природы от загрязнений промышленными выбросами / В. П. Кушелев. – М. : Химия, 1979. – 320 с.
136. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И. Я. Сигал. – Л. : Недра, 1977. – 294 с.
137. Беспмятнов Г. П. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде / Г. П. Беспмятнов, Ю. Л. Кратов. – Л. : Химия, 1985. – 230 с.
138. Инструкция по строительному проектированию предприятий, зданий и сооружений нефтяной и газовой промышленности : СН 433-79 / Госстрой СССР. – М. : Стройиздат, 1980. – 79 с.
139. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий : СН 245-71 / Госстрой СССР. – М. : Стройиздат, 1972. – 96 с.
140. Краткий справочник горного инженера / под ред. А. А. Бойко. – Изд. 2-е. – М. : Недра, 1971. – 520 с.
141. McIlvaine R. W. New scrubber technology-predictions for future use / R. W. McIlvaine // The Fourth International Clean Air Congress, Tokio, 1977 y. – Tokio, 1977. – p. 817-820.
142. Mitchell D. V. The Teller dry scrubber system – a new approach to furnace exhaust gas treatment / D. V. Mitchell // Glass. – 1980. – October. – 101 p.