

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра Гідравліка та водопостачання

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
на здобуття кваліфікаційного ступеня «магістр»

Галузь знань 19 Архітектура та будівництво  
Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія  
Спеціалізація Водопостачання та водовідведення  
Тема Забруднення акваторії р. Дніпро  
при аварійному витoku хімічно-небезпечної речовини

Керівник магістерської роботи  
Студент

проф. Біляєв М.М.  
Яловий Антон Сергійович

Дніпро  
2020 р.

## **Зміст**

1. Анотація
2. Вступ
3. Розділ 1. Забруднювачі води
4. Розділ 2. Джерела забруднення
5. Розділ 3. Контроль та очищення вод
6. Розділ 4. Постановка задачі
7. Висновки
8. Список використаної літератури

## Анотація

Річка Дніпро є важливим джерелом водопостачання. Але у випадку аварійних ситуацій можливе інтенсивне забруднення цього джерела водопостачання.

Тому важливою проблемою є створення математичних моделей за допомогою яких можливо прогнозувати динаміку забруднення акваторії при надзвичайних ситуаціях, що приводить до скиду значної кількості забруднювачів в річку.

**Мета роботи** - розробка чисельної моделі для оцінки впливу аварійного скиду забруднювача в акваторію річки.

**Об'єкт дослідження** – процес конвективно –дифузійного розповсюдження домішки у річці при скиді забруднюючих речовин.

**Предмет дослідження** - забруднення акваторії річки.

**Методи дослідження** – математичне моделювання.

**Практичне значення** - розроблена математична модель прогнозу якості поверхневих вод при аварійному скиді забруднювача.

**Ключові слова** – забруднення річки, аварія , математичне моделювання, скид забруднювача.

## Summary

The Dnipro River is an important source of water supply. But in case of emergencies, intensive pollution of this source of water supply is possible.

Therefore, an important problem is the creation of mathematical models with which it is possible to predict the dynamics of water pollution in emergencies, which leads to the discharge of a significant amount of pollutants into the river.

**The purpose of the work** is to develop a numerical model to assess the impact of accidental discharge of pollutants into the river.

**The object of research** is the process of convective-diffusion distribution of impurities in the river during the discharge of pollutants.

**The subject of research** - pollution of the river.

**Research methods** - mathematical modeling.

**Practical significance** - the developed mathematical model of the forecast of quality of surface waters at emergency dumping of a pollutant.

**Key words** - river pollution, accident, mathematical modeling, pollutant discharge.

## Вступ

В даний час проблема забруднення водних об'єктів (річок, озер, морів, ґрунтових вод і т.д.) є найбільш актуальною, тому що всім відомо - вираз "вода - це життя". Без води людина не може прожити більше трьох діб, але навіть розуміючи всю важливість ролі води в його житті, він все одно продовжує жорстко експлуатувати водні об'єкти, безповоротно змінюючи їх природний режим скидами і відходами. Тканини живих організмів на 70% складаються з води, і тому В. І. Вернадський визначав життя як живу воду. Води на Землі багато, але 97% - це солоня вода океанів і морів, і лише 3% - прісна. З цих три чверті майже недоступні живим організмам, тому що ця вода "законсервована" у льодовиках гір і полярних шапках (льодовики Арктики і Антарктики). Це резерв прісної води. З води, доступної живим організмам, основна частина укладена в їх тканинах.

Потреба у воді у організмів дуже велика. Наприклад, для освіти 1 кг біомаси дерева витрачається до 500 кг води. І тому її потрібно витрачати і не забруднювати. Основна маса води зосереджена в океанах. Що випаровується з його поверхні вода дає цілощодо вологу природним і штучним екосистемам суші. Чим ближче район до океану, тим більше там випадає опадів. Суша постійно повертає воду океану, частина води випаровується, особливо лісами, частина збирається річками, в які надходять дощові і снігові води. Обмін вологою між океаном і сушею вимагає дуже великої кількості енергії: на це витрачається до 1/3 того, що Земля отримує від Сонця.

Цикл води в біосфері до розвитку цивілізації був рівноважним, океан одержував від річок стільки води, скільки витрачав при її випаровуванні. Якщо не змінювався клімат, то ми не мілили річки і не знижувався рівень води в озерах. З розвитком цивілізації цей цикл став порушуватися, у результаті поливу сільськогосподарських культур збільшився випар з суші. Річки південних районів обмілили, забруднення океанів і поява на його поверхні нафтової плівки зменшило кількість води,

що випаровується океаном. Все це погіршує водопостачання біосфери. Більш частими стають посухи, виникають вогнища екологічних лих.

Крім того, і сама прісна вода, яка повертається в океан і інші водойми із суші, часто забруднена, практично не придатною для пиття стала вода багатьох річок Росії. Перш невичерпний ресурс - прісна чиста вода - ставати вичерпним. Сьогодні води, придатної для пиття, промислового виробництва і зрошення, не вистачає в багатьох районах світу. У даній роботі розглянута проблема забруднення водних об'єктів.

## Розділ 1

### Забруднювачі води



Найбільш поширене, стійке і далеко поширюється забруднення. Воно може бути органічним і неорганічним, токсичним і нетоксичним.

Стійкість і отруйність пестицидів забезпечили успіх в боротьбі з комахами (в тому числі з малярійними комарами), різними бур'янами та іншими шкідниками, які знищують посіви. Однак було доведено, що пестициди також є екологічно шкідливими речовинами, так як накопичуються в різних організмах і циркулюють всередині харчових, або трофічних, ланцюгів. Унікальні хімічні структури пестицидів не піддаються звичайним процесам хімічного і біологічного розкладання. Отже, коли рослини та інші живі організми, оброблені пестицидами, споживаються тваринами, отруйні речовини акумулюються і досягають високих концентрацій у їх організмі. У міру того як більші тварини поїдають дрібніших, ці речовини виявляються на більш високому рівні трофічного ланцюга. Це відбувається як на суші, так і у водоймах.

Хімікати, розчинені в дощовій воді і поглинені частинками ґрунту, в результаті їх вимивання потрапляють у ґрунтові води, а потім - в річки, дренажуючі сільськогосподарські угіддя, де починають накопичуватися в рибах і дрібніших водних організмах. Хоча деякі живі організми і

пристосувалися до цих шкідливих речовин, бували випадки масової загибелі окремих видів, ймовірно, через отруєння сільськогосподарськими отрутохімікатами. Наприклад, інсектициди ротенон і ДДТ і пестициди 2,4-D і ін. Завдали сильного удару по іхтіофауні. Навіть якщо концентрація отруйних хімікатів не смертельної, ці речовини можуть привести до загибелі тварин або інших згубних наслідків на наступному ступені трофічного ланцюга. Наприклад, чайки гинули після вживання в їжу великої кількості риби, що містить високі концентрації ДДТ, а деякі інші види птахів, що харчуються рибою, в тому числі білоголовий орлан і пелікан, опинилися під загрозою вимирання внаслідок зниження відтворення. Через потрапили в їх організм пестицидів яєчна шкаралупа стає настільки тонкою і тендітною, що яйця б'ються, а зародки пташенят гинуть.

#### Вплив токсичних металів

Такі токсичні метали, як ртуть, миш'як, кадмій і свинець, теж мають кумулятивним ефектом. Результат їх накопичення невеликими дозами може бути таким же, як і при отриманні одноразової великої дози. Ртуть, що міститься в промислових стоках, осідає в донних мулистих відкладеннях в річках і озерах. Що мешкають в мулі анаеробні бактерії переробляють її в отруйні форми (наприклад, метил-ртуть), які можуть призводити до серйозних уражень нервової системи і мозку тварин і людини, а також викликати генетичні мутації. Метилртуть - летюча речовина, що виділяється з донних опадів, а потім разом з водою потрапляє в організм риби і накопичується в її тканинах. Незважаючи на те що риби не гинуть, людина, котра з'їла таку заражену рибу, може отруїтися і навіть померти.

Іншим добре відомим отрутою, що надходять в розчиненому вигляді в водотоки, є миш'як. Він був виявлений в малих, але цілком вимірних кількостях в миючих засобах, що містять водорозчинні ферменти і фосфати, і барвниках, призначених для фарбування косметичних серветок і туалетного паперу. З промисловими стоками в акваторії потрапляють також свинець (використовуваний у виробництві металевих виробів, акумуляторних

батареї, фарб, скла, бензину та інсектицидів) і кадмій (використовуваний головним чином у виробництві акумуляторних батарей).

Інші неорганічні забруднювачі

У водоприймальних басейнах деякі метали, наприклад залізо і марганець, окислюються або в результаті хімічних або біологічних (під впливом бактерій) процесів. Так, наприклад, утворюється іржа на поверхні заліза і його сполук. Розчинні форми цих металів існують в різних типах стічних вод: вони були виявлені в водах, які просочилися з шахт і зі звалищ металобрухту, а також з природних боліт. Солі цих металів, що окислюються у воді, стають менш розчинними і утворюють тверді забарвлені опади, що випадають з розчинів. Тому вода набуває кольору і стає каламутною. Так, стоки залізорудних шахт і звалищ металобрухту забарвлені в рудий або оранжево-коричневий колір через присутність оксидів заліза (іржі).

Такі неорганічні забруднювачі, як хлорид і сульфат натрію, хлорид кальцію і ін. (Тобто солі, що утворюються при нейтралізації кислотних або лужних промислових стоків), не можуть бути перероблені біологічним або хімічним шляхом. Хоча самі ці речовини не трансформуються, вони впливають на якість вод, в які скидаються стоки. У багатьох випадках небажано використовувати "жорстку" воду з високим вмістом солей, так як вони утворюють осад на стінках труб і казанів.

Такі неорганічні речовини, як цинк і мідь, поглинаються мулистими донними опадами водотоків, що приймають стічні води, а потім разом з цими тонкими частинками транспортуються течією. Їх токсична дія сильніше в кислому середовищі, ніж в нейтральній або лужному. У кислих стічних водах вугільних шахт цинк, мідь і алюміній досягають концентрацій, смертельних для водних організмів. Деякі забруднювачі, будучи окремо не особливо токсичними, при взаємодії перетворюються в отруйні сполуки (наприклад, мідь в присутності кадмію).

## 1.2 Біологічне забруднення

Аміак є основним продуктом мікробіологічного розкладання білків і виділень тварин. Аміак і його газоподібні похідні аміни утворюються як при наявності, так і при відсутності розчиненого у воді кисню. У першому випадку аміак окислюється бактеріями з утворенням нітратів і нітритів. За відсутності кисню аміак, що не окислюється, і його вміст у воді залишається стабільним. При зниженні вмісту кисню утворилися нітрити та нітрати перетворюються в газоподібний азот. Відбувається це досить часто, коли води, що стікають з удобрених полів і вже містять нітрати, потрапляють в стоячі водойми, де накопичуються також і органічні залишки. У донних мулах таких водойм мешкають анаеробні бактерії, що розвиваються в безкисневому середовищі. Вони використовують кисень, присутній в сульфатах, і утворюють сірководень. Коли в з'єднаннях недостатньо доступного кисню, розвиваються інші форми анаеробних бактерій, які забезпечують гниття органічних речовин. Залежно від виду бактерій утворюються вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), водень ( $\text{H}_2$ ) і метан ( $\text{CH}_4$ ) - горючий газ без кольору і запаху, який називають також болотним газом.

Штучні матеріали, які розкладаються біологічним шляхом, збільшують навантаження на бактерії, що, в свою чергу, спричиняє зростання споживання розчиненого кисню. Ці матеріали спеціально створюються таким чином, щоб вони могли легко перероблятися бактеріями, тобто розкладатися. Природні органічні речовини зазвичай біорозкладні. Щоб цією властивістю володіли і штучні матеріали, хімічний склад багатьох з них (наприклад, миючих засобів, паперових виробів та ін.) був відповідним чином змінений. Перші синтетичні миючі засоби були стійкі до біологічного розкладання. Коли величезні клуби мильної піни стали накопичуватися у муніципальних очисних споруд і порушувати роботу деяких водоочисних станцій через насиченість патогенними мікроорганізмами або пливли вниз за течією річок, до цієї

обставини була привернута увага громадськості. Виробники миючих засобів дозволили проблему, зробивши свою продукцію біорозкладаною. Але таке рішення спровокувало і негативні наслідки, оскільки привело до підвищення БПК водотоків, що приймають стічні води, а, отже, прискоренню темпів витрати кисню.

Евтрофікація, або евтрофірованіє, - процес збагачення водою живильними речовинами, особливо азотом і фосфором, головним чином біогенного походження. В результаті відбувається поступове заростання озера і перетворення його в болото, заповнене мулом і розкладаються рослинними залишками, яке врешті-решт повністю висихає. У природних умовах цей процес займає десятки тисяч років, проте в результаті антропогенного забруднення протікає дуже швидко. Так, наприклад, в маленьких ставках і озерах під впливом людини він завершується всього за декілька десятиліть.

Евтрофікація посилюється, коли ріст рослин у водоймі стимулюється азотом і фосфором, що містяться в насичених добривами стоках з сільськогосподарських угідь, в чистячих і миючих засобах та інших відходах. Води озера, що приймає ці стоки, являють собою родючу середу, в якій відбувається бурхливе зростання водоростей, захоплюючих простір, в якому зазвичай живуть риби. Водорості та інші рослини, відмираючи, падають на дно і розкладаються аеробними бактеріями, які споживають для цього кисень, що призводить до замору риби. Озеро заповнюється плаваючими і прикріпленими водоростями і іншими водними рослинами, а також харчуються ними дрібними тваринами. Синьо-зелених водоростей, або ціанобактерії, роблять воду схожою на гороховий суп з поганим запахом і рибним смаком, а також покривають камені слизовою плівкою.

### 1.3 Фізичні забруднення

Температура води, використовуваної на теплових електростанціях для охолодження пара, підвищується на 3-10 ° С, а іноді до 20 ° С. Щільність і в'язкість нагрітої води відрізняються від властивостей більш холодної води приймаючого басейну, тому вони перемішуються поступово. Тепла вода охолоджується або навколо місця зливу, або в змішаному потоці, поточному вниз за течією річки.

Потужні електростанції помітно нагрівають води в річках і бухтах, на яких вони розташовані. Влітку, коли потреба в електричній енергії для кондиціонування повітря дуже велика і її вироблення зростає, ці води часто перегріваються. Поняття "потепління" відноситься саме до таких випадків, так як надлишкове тепло зменшує розчинність кисню в воді, прискорює темпи хімічних реакцій і, отже, впливає на життя тварин і рослин в водоприймальних басейнах.

Існують яскраві приклади того, як в результаті підвищення температури води гинули риби, виникали перешкоди на шляху їх міграцій, швидкими темпами розмножувалися водорості та інші нижчі сміттєві рослини, відбувалися несвоєчасні сезонні зміни водного середовища. Однак в деяких випадках збільшувалися улови риби, продовжувався вегетаційний період, і простежувалися інші сприятливі наслідки. Тому підкреслимо, що для більш коректного вживання терміну "теплове забруднення" необхідно мати набагато більше інформації про вплив додаткового тепла на водне середовище в кожному конкретному місці.

Радіоактивні ізотопи, або радіонукліди (радіоактивні форми хімічних елементів), також акумулюються всередині харчових ланцюгів, так як є стійкими за своєю природою. У процесі радіоактивного розпаду ядра атомів радіоізоотопів випускають елементарні частинки і електромагнітне випромінювання. Цей процес починається одночасно з формуванням радіоактивного хімічного елемента і триває до тих пір, поки всі його атоми

не трансформується під впливом радіації в атоми інших елементів. Кожен радіоізотопи характеризується певним періодом напіврозпаду - часом, за яке число атомів в будь-якому його зразку зменшується вдвічі. Оскільки період напіврозпаду багатьох радіоактивних ізотопів досить значний (наприклад, мільйони років), їх постійне випромінювання може зрештою призвести до жахливих наслідків для живих організмів, що населяють водойми, в які скидаються рідкі радіоактивні відходи.

Відомо, що радіація руйнує тканини рослин і тварин, призводить до генетичних мутацій, безпліддя, а при достатньо високих дозах - до загибелі. Механізм впливу радіації на живі організми досі остаточно не з'ясований, відсутні і ефективні способи пом'якшення або запобігання негативним наслідкам. Але відомо, що радіація накопичується, тобто повторюване опромінення малими дозами може в кінцевому рахунку діяти так само, як і одноразове сильне опромінення.

## Розділ 2

### Джерела забруднення

Найбільш відомим джерелом забруднення води, якому традиційно приділяється головна увага, є побутові (або комунальні) стічні води. Водоспоживання міст зазвичай оцінюють на основі середнього добової витрати води на одну людину, в Росії рівного приблизно 400 л і що включає воду питну, для приготування їжі та особистої гігієни, для роботи побутових сантехнічних пристроїв і іншого. Майже вся використана вода надходить в каналізацію. Оскільки щодня в стічні води потрапляє величезний обсяг фекалій, головним завданням міських служб при переробці побутових стоків в колекторах очисних установок є видалення патогенних мікроорганізмів. При повторному використанні недостатньо очищених фекальних стоків містяться в них бактерії і віруси можуть викликати кишкові захворювання (тиф, холеру і дизентерію), а також гепатит і поліомієліт.

У розчиненому вигляді в стічних водах присутні мило, синтетичні пральні порошки, дезінфікуючі засоби, відбілювачі та інші речовини побутової хімії. З житлових будинків надходить паперове сміття, включаючи туалетний папір і дитячі підгузники, відходи рослинної і тваринної їжі. З вулиць в каналізацію стікає дощова і тала вода, часто, з піском або сіллю, використовуваними для прискорення танення снігу і льоду на проїжджій частині вулиць і тротуарах.

В індустріально розвинених країнах головним споживачем води і найбільшим джерелом стоків є промисловість. Промислові стоки в річки за об'ємом в 3 рази перевищують комунально-побутові. Вода виконує різні функції, наприклад, служить сировиною, обігрівачем і охолоджувачем в технологічних процесах, крім того, транспортує, сортує і промиває різні матеріали. Вода також виводить відходи на всіх стадіях виробництва - від видобутку сировини, підготовки напівфабрикатів до випуску кінцевої продукції і її розфасовки. Оскільки набагато дешевше викидати відходи

різних виробничих циклів, ніж переробляти і утилізувати, з промисловими стоками скидається величезна кількість різноманітних органічних і неорганічних речовин. Більше половини стоків, що надходять у водойми, дають чотири основні галузі промисловості: целюлозно-паперова, нафтопереробна, промисловість органічного синтезу і чорна металургія (доменне і сталеплавильне виробництва). Через зростаючого обсягу промислових відходів порушується екологічна рівновага багатьох озер і річок, хоча велика частина стоків нетоксична і не смертельною для людини.

Кислотні опади виникають головним чином через викиди оксидів сірки і азоту в атмосферу при спалюванні викопного палива (вугілля, нафти і природного газу). Розчиняючись в атмосферній волозі, ці оксиди утворюють слабкі розчини сірчаної та азотної кислот і випадають у вигляді кислотних дощів.

Відносна кислотність розчину виражається індексом рН (кислотність визначається наявністю вільних іонів водню  $H^+$ ; рН - це показник концентрації іонів водню). При рН = 1 розчин є сильну кислоту (як електроліт в акумуляторній батареї); рН = 7 означає нейтральну реакцію (чиста вода), а рН = 14 - це сильний луг (луг). Оскільки рН вимірюється в логарифмічною шкалою, водне середовище з рН = 4 в десять разів більше кисла, ніж середовище з рН = 5, і в сто разів більше кисла, ніж середовище з рН = 6.

Звичайна незабруднена дощова вода має рН = 5,65. Кислотними називаються дощі з рН менше 5,65.

Головними джерелами оксидів сірки ( $SO_2$  і  $SO_3$ ), що обумовлюють утворення сірчаної кислоти, є теплові електростанції, що працюють на нафті і вугіллі, а також металургійні заводи. Оксид азоту ( $NO$ ) і діоксид азоту ( $NO_2$ ), з яких утворюється азотна кислота, надходять в атмосферу приблизно в рівних кількостях від теплових електростанцій, що працюють на нафтопродуктах і вугіллі, і з вихлопними газами автомобільних двигунів. Порівняно невелика кількість соляної кислоти в атмосферних

опадах утворюється в результаті акумуляції газоподібного хлору від різних природних і промислових джерел. Кислотні дощі можуть також випадати під час вступу в атмосферу сірчаної кислоти і азотвмісних газів (діоксиду азоту NO<sub>2</sub> і аміаку NH<sub>3</sub>) від природних джерел (наприклад, при виверженні вулканів).

Різні природні обставини різним чином реагують на підвищення кислотності. Кислотні опади можуть призвести до зміни хімічних властивостей ґрунту і води. Там, де вода в річках і озерах стала досить кислою (рН менше 5) зникає риба. При порушенні трофічних ланцюгів скорочується число видів водних тварин, водоростей і бактерій.

Найбільш масштабне одноразове вживання води - виробництво електроенергії, де вона використовується головним чином для охолодження і конденсації пари, що виробляється турбінами теплових електростанцій. При цьому вода нагрівається в середньому на 7 ° С, після чого скидається безпосередньо в річки і озера, будучи основним джерелом додаткового тепла, який називають "тепловим забрудненням". Проти вживання цього терміна є заперечення, оскільки підвищення температури води іноді призводить до сприятливим екологічним наслідкам.

Другим основним споживачем води є сільське господарство, що використовує її для зрошення полів. Стікає з них вода насичена розчинами солей і ґрунтовими частками, а також залишками хімічних речовин, що сприяють підвищенню врожайності. До них відносяться інсектициди; фунгіциди, які розпилюють над фруктовими садами і посівами; гербіциди, знамените засіб боротьби з бур'янами; та інші пестициди, а також органічні і неорганічні добрива, що містять азот, фосфор, калій і інші хімічні елементи.

Крім хімічних сполук, в річки потрапляє великий обсяг фекалій та інших органічних залишків з ферм, де вирощуються м'ясо-молочна велика рогата худоба, свині або домашня птиця. Багато органічних відходів також надходить в процесі переробки продукції сільського господарства (при

обробленні м'ясних туш, обробці шкір, виробництві харчових продуктів та консервів і т.д.).

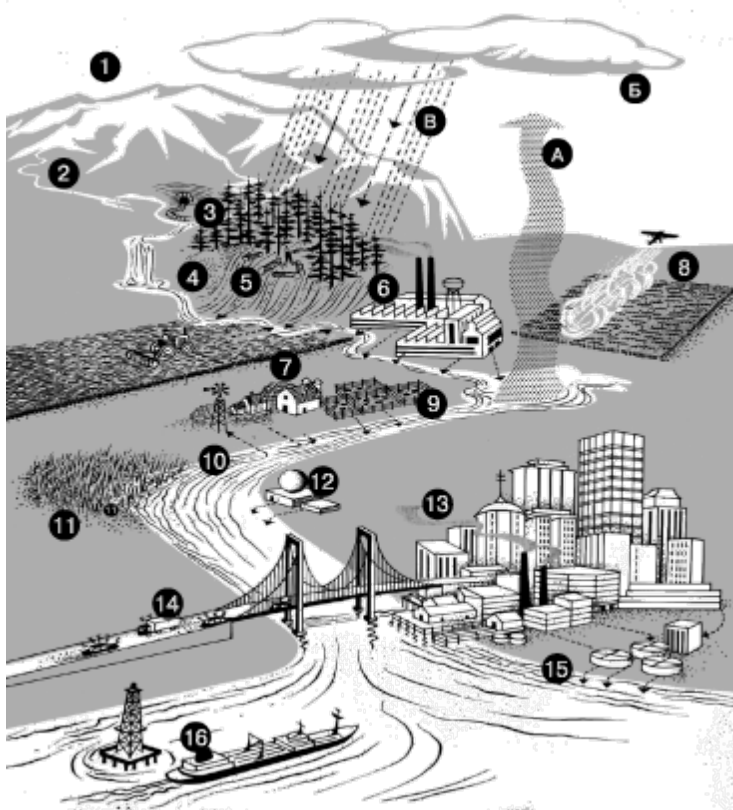


Рисунок 2.1 Схема водообігу

Три важливих стадії кругообігу води: випаровування (А), конденсація (Б) і атмосферні опади (В). Якщо в нього залучено дуже багато природних або штучних забруднюючих речовин з перерахованих нижче джерел, природна система не справляється з очищенням води.

Радіоактивні частинки, пил і гази надходять з атмосфери разом зі снігом, що випадає і накопичується в високогір'ях.

Талі льодовикові води з розчиненими забруднюючими речовинами стікають вниз з високогір'я, формуючи витoki річок, які на своєму шляху до моря захоплюють частинки ґрунту і гірських порід, розмиваючи поверхні, за якими вони течуть.

Води, дренирующие гірничі виробки, містять кислоти і інші неорганічні речовини.

Вирубка лісів сприяє розвитку ерозії. Багато забруднюючі речовини скидаються в річки підприємствами целюлозно-паперової промисловості, на яких обробляється деревина.

Дощові води вимивають хімічні речовини з ґрунту і рослин, що розкладаються, транспортують їх в ґрунтові води, а також змивають зі схилів в річки ґрунтово-ґрунтові частинки.

Промислові гази потрапляють в атмосферу, а звідти разом з дощем або снігом - на землю. Промислові стоки надходять безпосередньо в річки. Залежно від галузі промисловості сильно розрізняється склад газів і стічних вод.

Органічні інсектициди, фунгіциди, гербіциди та добрива, розчинені у водах, дренажних сільськогосподарські угіддя, поступають в річки.

Обпилювання полів пестицидами забруднює повітряне і водне середовище.

Коров'ячий гній і інші залишки тваринного походження - основні забруднювачі місць великих скупчень тварин на пасовищах і скотарнях.

При відкачці прісних ґрунтових вод може відбутися засолення в результаті підтягання до їх дзеркала мінералізованих вод з естуаріїв і морських басейнів.

Метан продукується бактеріями як в природних болотах, так і в стоячих водоймах при надлишку органічних забруднювачів антропогенного генезису.

Теплове забруднення річок відбувається через надходження від електростанцій нагрітих вод.

Міста є джерелами різних відходів, включаючи як органічні, так і неорганічні.

Вихлопні гази двигунів внутрішнього згоряння - основні джерела забруднення повітряного середовища. Вуглеводні адсорбуються містяться в повітрі вологою.

Великі предмети і частинки віддаляються з комунально-побутових стічних вод на станціях попереднього очищення, органіка - на станціях вторинного очищення. Від багатьох речовин, що надходять з промисловими стоками, неможливо позбутися.

Розливи нафти від морських нафтових свердловин і з танкерів забруднюють води і пляжі.

## Розділ 3

### Контроль і очищення вод

Практикуються три основні методи очищення стічних вод. Перший існує давно і найбільш економічний: скидання стічних вод у великі водотоки, де вони розбавляються прісною проточною водою, аеруються і нейтралізуються природним чином. Очевидно, що цей метод не відповідає сучасним умовам. Другий метод багато в чому базується на тих же природних процесах, що і перший, і полягає у видаленні і зниженні вмісту твердих і органічних речовин механічним, біологічним і хімічним способами. Його в основному використовують на комунальних очисних станціях, які рідко мають у своєму розпорядженні обладнання для переробки промислових і сільськогосподарських стоків. Широко відомий і досить поширений третій метод, що складається в скороченні обсягу стічних вод шляхом зміни технологічних процесів; наприклад, в результаті вторинної переробки матеріалів або використання природних методів боротьби з шкідниками замість пестицидів і т.д.

Хоча зараз багато промислових підприємств намагаються очистити свої стоки або зробити виробничий цикл замкнутим, а виробництво пестицидів та інших токсичних речовин заборонено, найрадикальнішим і швидким вирішенням проблеми забруднення води буде будівництво додаткових і сучасніших очисних споруд.

Зазвичай на шляху потоку стічних вод встановлюються грати або сита, які уловлюють плаваючі предмети і зважені частинки. Потім пісок і інші грубі неорганічні частинки осідають в песколовках з похилим дном або уловлюються ситами. Масла і жири видаляються з поверхні води спеціальними пристосуваннями (нефтеловушками, жироловками та ін.). На деякий час стічні води перекидаються у відстійники для осадження дрібних частинок. Свободноплаваючі пухкі частинки осаджують шляхом додавання хімічних коагулянтів. Отриманий таким чином отстой, на 70% складається з

органічних речовин, пропускається через спеціальний залізобетонний резервуар - метантанк, в якому він переробляється анаеробними бактеріями. В результаті утворюються рідкий і газоподібний метан, вуглекислий газ, а також мінеральні тверді частинки. При відсутності метантанк тверді відходи закопуються, скидаються на звалища, спалюються (що призводить до забруднення повітря) або висушуються і використовуються як гумус або добриво.

Вторинна очистка здійснюється в основному біологічними методами. Оскільки на першому етапі органічні речовини не видаляються, на наступному - використовуються аеробні бактерії для розкладання зваженої і розчиненої органіки. При цьому головне завдання полягає в тому, щоб привести стоки в контакт з якомога більшою кількістю бактерій в умовах гарної аерації, так як бактерії повинні мати можливість споживати достатню кількість розчиненого кисню. Стічні води пропускають через різні фільтри - піщані, з щебеню, гравію, керамзиту або синтетичних полімерів (при цьому досягається такий же ефект, як і в процесі природного очищення в русловому потоці, що пододало відстань у кілька кілометрів).

На поверхні фільтруючого матеріалу бактерії утворюють плівку і розкладають органіку стічних вод у міру їх проходження через фільтр, знижуючи таким чином БПК більш ніж на 90%. Це т.зв. бактеріальні фільтри. Зниження БПК на 98% досягається в аеротанках, в яких завдяки примусовій аерації стічних вод і перемішування їх з активним мулом прискорюються природні процеси окислення. Активний мул утворюється у відстійниках з зважених в стічній рідині частинок, що не затриманих при попередньому очищенні і адсорбованих колоїдними речовинами з розмножуються в них мікроорганізмами.

Іншим методом вторинної очистки є тривалий відстоювання води в спеціальних ставках або лагунах (поля зрошення або поля фільтрації), де водорості споживають вуглекислий газ і виділяють необхідний для

розкладання органіки кисень. В цьому випадку БПК знижується на 40-70%, але потрібні певні температурні умови і сонячне освітлення.

Стічні води, що пройшли первинну і вторинну очистку, ще містять розчинені речовини, які роблять їх практично непридатними для будь-яких потреб, крім зрошення. Тому були розроблені та апробовані більш досконалі методи очищення, призначені для видалення залишилися забруднювачів. Деякі з цих методів використовуються в установках, що очищають питну воду водосховищ. Такі повільно розкладаються органічні сполуки, як пестициди і фосфати, видаляються фільтрацією пройшли вторинну очистку стічних вод через активоване (порошкоподібний) деревне вугілля, або додаванням коагулянтів, що сприяють агломерації дрібних частинок і осадження утворилися пластівців, або обробкою такими реагентами, які забезпечують окислення.

Розчинені неорганічні речовини видаляються іонним обміном (розчинені іони солей і металів); хімічним осадженням (солі кальцію і магнію, які утворюють наліт на внутрішніх стінках котлів, цистерн і труб), пом'якшувальною водою; зміною осмотичного тиску для посиленої фільтрації води через мембрану, яка затримує концентровані розчини поживних речовин - нітратів, фосфатів і ін .; виведенням азоту потоком повітря при проходженні стоків через аміачно-десорбційну колону; і іншими методами. У світі існує лише кілька підприємств, які можуть проводити повну очистку стічних вод.

Головна мета водоочищення - виробництво бактеріально безпечної води. Найбільш поширений спосіб дезінфекції води - введення в неї хлору - сильного окислювача, який додається до води у вигляді газу або концентрованого водного розчину. Ефективність обробки хлором залежить від ряду факторів, у тому числі рН (заходи кислотності або лужності води), часу обробки, температури і наявності взаємодіючих з хлором органічних речовин. Невелика кількість вільного хлору залишається у воді на випадок потрапляння забруднень в споживчу водопровідну мережу. Оскільки при

побутовому використанні води у водостік скидається багато коліформних бактерій, виявлення цих бактерій служить показником побутового забруднення (колі-індекс).

Мутність і кольоровість усуваються додаванням до води хімічно активної речовини і її подальшим відстоюванням. Додається речовина сприяє зростанню малих частинок і перетворенням їх в більш великі, поки під дією власної ваги вони не почнуть осідати. Такий вимушений процес осідання займає 1-2 ч. Цей процес утворення осаду називається хімічної коагуляцією. Як хімічно активних речовин використовуються головним чином сполуки, що утворюють у водному розчині іони алюмінію і тривалентного заліза (сульфат алюмінію і хлорид або сульфат тривалентного заліза).

Типові джерела смаку і запаху природних, побутових і промислових вод - мікроорганізми, наприклад водорості, в поверхневих водах і сульфідів в підземних водах, бідних киснем. Сполуки, що мають неприємний смак і запах, зазвичай видаляються шляхом додавання до води активованого вугілля і подальшої седиментації. Можна також поставити під такі сполуки окислення, наприклад хлором або озоном.

На водоочисній станції, де до води додаються хімічно активні речовини і вона відстоюється для видалення домішок, вода також пропускається через пісок для фільтрування. Вода і хімікати-коагулянти ретельно й інтенсивно перемішуються. Через приблизно 30 хв вода з укрупненими частинками домішок запускається в седиментаційну установку, де велика частина домішок осідає і видаляється з води; цей процес займає близько 2 ч. Освітлена вода прямує в відстійники, де фільтрується через шари піску і гравію і проходить через донну основу. Донна основа не тільки служить опорою для шарів гравію і піску, але також пропускає воду, періодично використовується для промивання фільтрувальних шарів від опадів, залишених очищається водою. Фільтрована вода зберігається в резервуарах або закачується в водопровідну мережу після заключного хлорування.

Проблема зменшення жорсткості води частково може бути вирішена шляхом використання синтетичних миючих засобів. За допомогою хімічної коагуляції або іонного обміну частково або повністю віддаляються створюють жорсткість домішки (головним чином бікарбонати кальцію і магнію). Цей процес називається м'якшення води.

У системах хімічної коагуляції до води для її м'якшення додається вапно, яка реагує з бікарбонатами, перетворюючи їх в карбонати, що випадають в осад. Осад видаляється седиментацією і подальшим фільтруванням через пісок.

Іонний (точніше, катіонний) обмін для м'якшення полягає в заміщенні іонів жорсткості, кальцію і магнію, на іон нежорсткості, натрій. На цьому принципі засновані домашні системи м'якшення води. За допомогою іонного обміну можна, в принципі, замінити всі катіони в воді воднем, а все аніони - киснем. У підсумку вийде  $H_2O$ , тобто чиста вода. Такий процес називається обессолюванням.

У воді можуть бути розчинені або зважені і інші хімічні елементи або сполуки, що впливають на її якість. Залізо витягується шляхом окислення киснем повітря і видалення нерозчинного з'єднання седиментацією або фільтруванням. Для магнію поряд з аерацією потрібно контакт з адсорбентом. Якщо залізо або магній присутні у воді в формі органічних комплексів, слід використовувати окислення і хімічну коагуляцію.

Часто до водопровідної води додається фтор з причини, не пов'язаної з дотриманням основних стандартів безпеки і чистоти питної води. Наявність у воді фтору в дуже малій концентрації уповільнює утворення карієсу зубів, особливо у дітей.

Чиста вода прозора, безбарвна, не має запаху і смаку, населена безліччю риб, рослин і тварин. Забруднені води каламутні, з неприємним запахом, не придатні для пиття, часто містять величезну кількість бактерій і водоростей. Система самоочищення води (аерація проточною водою і

осадження на дно зважених часток) не спрацьовує через надлишок в ній антропогенних забруднювачів.

Зменшення вмісту кисню. Органічні речовини, що містяться в стічних водах, розкладаються ферментами аеробних бактерій, які поглинають розчинений у воді кисень і виділяють вуглекислий газ у міру засвоєння органічних залишків. Загальновідомими кінцевими продуктами розпаду є вуглекислий газ і вода, але можуть утворюватися і багато інших з'єднань. Наприклад, бактерії переробляють азот, що міститься у відходах, в аміак ( $\text{NH}_3$ ), який, з'єднуючись з натрієм, калієм або іншими хімічними елементами, утворює солі азотної кислоти - нітрати. Сірка перетворюється в сірководневі сполуки (речовини, що містять радикал  $-\text{SH}$  або сірководень  $\text{H}_2\text{S}$ ), які поступово переходять в сірку (S) або в сульфат-іон ( $\text{SO}_4^-$ ), також утворює солі.

У водах, що містять фекальні маси, рослинні або тваринні залишки, що надходять з підприємств харчової промисловості, паперові волокна і залишки целюлози від підприємств целюлозно-паперової промисловості, процеси розкладання протікають практично однаково. Оскільки аеробні бактерії використовують кисень, першим результатом розпаду органічних залишків є зменшення вмісту кисню, розчиненого у приймаючих стоки водах. Воно змінюється в залежності від температури, а також в деякій мірі - від солоності і тиску. Прісна вода при  $20^\circ \text{C}$  і інтенсивної аерації в одному літрі містить 9,2 мг розчиненого кисню. З підвищенням температури води цей показник зменшується, а при її охолодженні - збільшується. За нормативами, що діють при проектуванні міських очисних споруд, для розпаду органічних речовин, що містяться в одному літрі комунальних стічних вод звичайного складу при температурі  $20^\circ \text{C}$ , потрібно приблизно 200 мг кисню протягом 5 днів. Це значення, зване біохімічної потребою в кисні (БПК), прийнято як стандарт при розрахунках кількості кисню, необхідного для очищення даного обсягу стоків. Величина БПК стічних вод підприємств шкіряної,

мясооброблювачою і цукрорафінадноо промисловоо набагато вище, ніж комунальних стоків.

У дрібних водотоках з швидкоо течею, де вода інтенсивно перемішується, що надходить з атмосфери кисень компенсує виснаження його запасів, розчинених у воді. Одночасно вуглекислий газ, що утворюється при розкладанні містяться в стічних водах речовин, випаровується в атмосферу. Таким чином скорочується термін несприятливого впливу процесів розкладання органіки. І навпаки, у водоймах зі слабким плином, де води перемішуються повільно і ізольовані від атмосфери, неминуче зменшення вмісту кисню і зростання концентрації вуглекислого газу тягнуть за собою серйозні зміни. Коли вміст кисню зменшується до певного рівня, відбувається замор риби і починають гинути інші живі організми, що, в свою чергу, призводить до збільшення обсягу розкладається органіки.

Велика частина риб гине через отруєння промисловими і сільськогосподарськими стоками, але багато - і від нестачі у воді кисню. Риби, як і всі живі істоти, поглинають кисень і виділяють вуглекислий газ. Якщо кисню у воді мало, але висока концентрація вуглекислого газу, інтенсивність їх дихання знижується (відомо, що вода при високому вмісті вугільної кислоти, тобто розчиненого в ній вуглекислого газу, стає кислою).

У водах, що зазнають потепління, часто створюються умови, що призводять до загибелі риб. Там знижується вміст кисню, так як він слабо розчиняється в теплій воді, однак потреба в кисні різко зростає, оскільки збільшуються темпи його споживання аеробними бактеріями і рибами. Додавання кислот, наприклад сірчаної, з дренажними водами з вугільних шахт також істотно знижує здатність деяких видів риб витягати з води кисень.

На сьогодні не можна не звертати уваги на цю проблему, тому що якщо не на нас, то на наших дітях позначаться всі наслідки антропогенного забруднення води. Внаслідок проживання в небезпечно отруєної середовища

проживання поширюються ракові та інші екологічно залежні захворювання різних органів. У половини новонароджених отримали навіть незначне додаткове опромінення на певному етапі формування плоду в тілі матері, виявляються затримки розумового розвитку.

## Розділ 4

### Постановка задачі

Розглядається забруднення акваторії річки та атмосфери при аварійному викиді аміаку на відкритій ділянці магістральному аміакопроводі Тольятті – Одеса - на вісячому мосту біля с. Вовниги (рис.4.1).



Рисунок 4.1. ВиглядаміакопроводуТольятті-Одеса при перетині р. Дніпро

При цьому розглядаються такі задачі:

1. забруднення акваторії річки при потраплянні струменю аміаку в р. Дніпро у випадку пошкодження труби аміакопроводу на мосту;
2. забруднення акваторії та атмосфери при падінні труби амакопроводу в р. Дніпрої та формуванні шлейфу аміаку над водною поверхнею

Підкреслимо, що друга задача – це комплексна задача, що пов'язує такі процеси: аварійне потрапляння аміаку в воду + формування зони забруднення акваторії + підйом аміаку до вільної поверхні річки + випарювання аміаку з вільної поверхні + перенос аміаку от зони випарювання в атмосферу. Тобто, буде вирішуватися по'язана задача.

Потрібно відзначити, що при моделюванні процесу забруднення навколишнього середовища буде враховуватися:

1. нерівномірний рух води в акваторії;
2. нерівномірний рух атмосферного повітря над вільною поверхнею річки;

Врахування цих процесів дуже ускладнює рішення задачі. Для рішення даних задач потрібно розробити спеціалізовані методи розрахунку.

#### 4.2. Прогнозування рівняння акваторії річки при аварійної емісії аміаку

Розглядається виток зрідженого аміаку з аміакопроводу в акваторії р. Дніпро. Розрахункова схема показана на рис.4.2. Виконується прогнозування забруднення акваторії річки при такої аварійної ситуації.

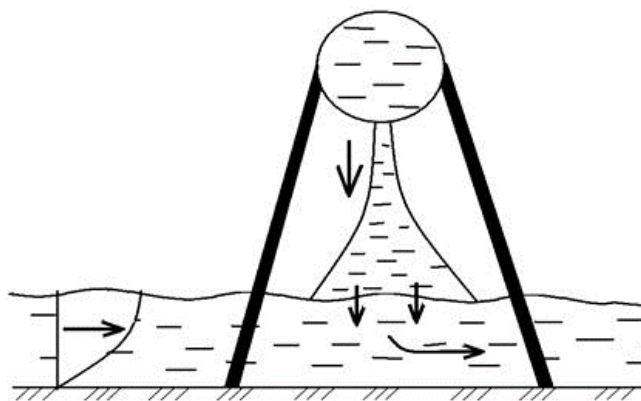


Рисунок 4.2 - Схема витoku аміаку

Слід підкреслити, що дана задача має особливість, а саме – необхідно врахувати взаємодію двох потоків при моделюванні забруднення акваторії річки. Перший потік – потік води в річці, другий потік – потік аміаку, що потрапляє в річку зверху. Це буде реалізовуватися при заданні граничних умов задачі.

Враховуємо, що швидкість потоку в акваторії змінюється з глибиною. Для визначення цього будемо використовувати емпіричну залежність [Пособие к Снп]

(4.1)

де  $h$  – відносна глибина;  $u$  - місцева швидкість потоку;  $u_{cp}$  - середня швидкість потоку;  $K$  - параметр швидкості по вертикалі.

Відносна глибина визначається так [ Пособие к Снип ]

$$h = \frac{y}{H}$$

де  $y$  – координата точки;  $H$  – глибина потоку.

Для моделювання гідродинамики в акваторії р. Дніпро з урахуванням взаємодії двох потоків, будемо використовувати рівняння Лапласу для потенціалу швидкості

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0$$

Граничні умови для цього рівняння такі:

1.  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$  - надні річки та верхній границе розрахункової області;
2.  $\frac{\partial P}{\partial n} = u(y)$  - на границі, де потік входить в розрахункову область.

Відзначимо, що місцева швидкість  $u(y)$  в акваторії, на вході в розрахункову область, розраховується на базі залежності (4.1); на верхній межі розрахункової області потік забруднювача з пошкодженої труби надходить в акваторію з іншою швидкістю (рис.4.2). Методика розрахунку цієї швидкості показана нізче.

3.  $P = \text{const}$  – на границі «виходу» водного потоку.

Відзначимо, що струменяміаку виходить з отвору в пошкодженому трубопроводі зі швидкістю

$$U = \varphi \sqrt{2gH_a}$$

де  $\varphi$  - коефіцієнт швидкості;  $H_a$  - напір в аміакопроводі.

Але струменяміаку досягає акваторії річки з іншою швидкістю.

Ця середня швидкість визначається так [Костю ]

$$v_e = \frac{0.226U}{\frac{ax}{d} + 0.145}$$

де  $a$ - коефіцієнт турбулентності,  $d$ - діаметр отвору;  $x$ - довжина до розрахункового перерізу.

Відзначимо, що в роботі буде враховуватися ця швидкість входу струменя аміаку в акваторію, що реалізується в моделі к гранична умова для рівняння для потенціалу швидкості (гранична умова 2).

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласу використовуємо двушагову схему розщеплення. Для цього це рівняння приводимо до вигляду

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \quad (4.2)$$

де  $\eta$  - фиктивний час.

При рішення рівняння (2.17) буде прагне до «встановлення», т.т. До вирішення рівняння (2.10).

Схема розщеплення має вигляд:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[ \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]$$

Звідси отримуємо розрахункові залежності:

$$P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = P_{i,j}^n + \Delta t \cdot \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Delta t \cdot \left[ \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]$$

Розрахунок за ціми залежностями закінчується коли

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n \right| \leq \varepsilon,$$

де  $\varepsilon$  – мале число;  $n$  – номер ітерації (кількість кроків за «часом»).

У чисельній моделі застосовуються фіктивні різницеві осередки для реалізації умови непротекання на поверхні землі.

На другому етапі розраховуються компоненти вектора швидкості вітру на гранях осередків [54]. У чисельній моделі застосовуються фіктивні різницеві осередки для реалізації умови непротекання на поверхні землі.

На другому етапі розраховуються компоненти вектора швидкості вітру на гранях осередків [54]

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x},$$

$$v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y},$$

Для чисельного моделювання процесу забруднення акваторії річки при потраплянні в акваторію аміака, використовується двувимірне рівняння масопереносу, що аналогічно рівнянню переносу аміака в атмосферному повітрі (розділ 3), але з іншими значеннями коефіцієнтів дифузії [Белозеров]

$$\mu_x = \mu_y = \frac{guH}{37nC^2},$$

де  $g$  – прискорення сили тяготіння,  $u$  – середня швидкість течії,  $H$  – середня глибина,  $n$  – коефіцієнт шоркості,  $C$  – коефіцієнт Шезі.

Коефіцієнт Шезі розраховується за формулою Манінга так

$$C = \frac{1}{n R^{\frac{1}{6}}}$$

Для рівнинних річок можливо враховувати, що  $R=H$

Постановка крайових умов для рівняння масопереносу аміака в акваторії таке ж як для рівняння масопереносу аміака в атмосфері [Марчук].

Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу здійснено таке його розщеплення

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0,$$

(4.2)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (4.3)$$

Тобто, рівня масопереносу розщеплюється на два рівняння переносу аміака за рахунок конвекції та рівнянн дифузії. Для чисельного інтегрування перших двох рівнянь використовується метод МакКормака. Згідно з цим методом, розрахункові різницеві рівняння мають вигляд:

-етап – предіктор:

$$C_{i,j}^{n+a} = C_{i,j}^{n+a} - u_{i,j} \left( \frac{C_{i+1,j}^n - C_{i,j}^n}{\Delta t} \right).$$

$$C_{i,j}^{n+a} = C_{i,j}^{n+a} - v_{i,j} \left( \frac{C_{i,j+1}^n - C_{i,j}^n}{\Delta t} \right).$$

-етап –коректор:

$$C_{i,j}^{n+1} = C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j} \left( \frac{C_{i,j}^{n+a} - C_{i-1,j}^{n+a}}{\Delta t} \right).$$

$$C_{i,j,k}^{n+1} = C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - w_{i,j,k} \left( \frac{C_{i,j,k}^{n+a} - C_{i,j,k-1}^{n+a}}{\Delta t} \right).$$

$$C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \left( \frac{C_{i,j}^{n+a} + C_{i,j}^n}{\Delta t} \right).$$

де

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії використовується метод Річардсона. Розрахункова залежність має вигляд

$$C_{ij}^{n+1} = C_{ij}^n + \Delta t \frac{C_{i+1,j}^n - 2C_i^n + C_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \\ + \Delta t \frac{C_{i,j+1}^n - 2C_i^n + C_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}$$

На основі побудованої чисельної моделі створено код на алгоритмічній мові FORTRAN. Розроблений код побудований на модульному принципі, що дозволяє легко побудувати його на рішення широкого кола завдань даного класу. В состав даного коду входять :

1. «Ак2.dat» – файл задання початкових даних
2. «Ак23» – підпрограма типа “*SUBROUTINE*” для розрахунку концентрації аміаку в акваторії річки;
3. «Ак24» – підпрограма типа “*SUBROUTINE*” для розрахунку поля потенціалу швидкості;
4. «Ак25» – підпрограма типа “*SUBROUTINE*” для розрахунку сумарного поля швидкості в річці при взаємодії струменя аміаку та основного потоку води в акваторії;
5. «Ак26» – підпрограма типа “*SUBROUTINE*” для розрахунку середньої швидкості входу струменя аміаку в акваторію;
6. «Ак27» – підпрограма для друку результатів прогнозування.

Результатом роботи даного коду є концентраційне поле аміаку в акваторії річки на конкретному часовому кроці.

Даний код був використаний для розрахунку забруднення акваторії р. Дніпро і, впершу чергу, для прогнозу глибини пронення струменю аміаку в річку.

При проведенні обчислювального експерименту використовувались дані, надані проектно-вишукувальним інститутом «Днепрогіпродгосп» (карта глибин р. Дніпро, швидкість течії).

Розрахунок виконаний при таких параметрах: середня швидкість течії в р. Дніпро на розглянутій ділянці 1.2 м/с; коефіцієнт шоркості 0,035; -

коефіцієнт турбулентності – 0.076, приведений діаметр отвору в пошкодженому трубопроводі – 0.35м; коефіцієнт швидкості – 0.9; довжина від пошкодженого аміакопроводу до вільної поверхні акваторії річки – 17м; надлишковий тиск в аміакопроводі - 35 ат; глибина річки 29 м; концентрація забруднювача в струмені 611 кг/м<sup>3</sup>; довжина розрахункової області 85 м. Динаміка емісії аміаку розраховується на базі моделі, що розглянута в розділі 2.

Результати обчислювального експерименту показані на рисунках нізче. На даних малюнках представлені ізолінії концентрації аміаку в річці для різних моментів часу (тут представлено розподіл концентрації у відсотках від концентрації у вхідному потоці). Представлені рисунки дозволяють виявити динаміку формування зони забруднення а акваторії в перші секунди після аварії на аміакопроводі.

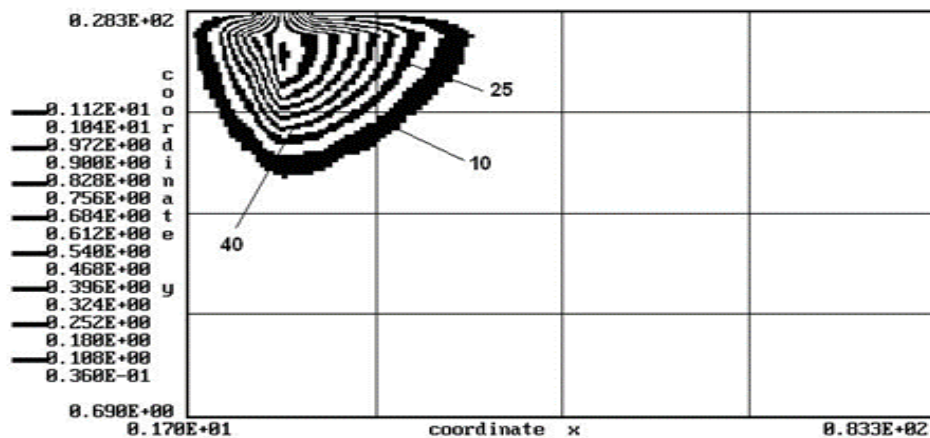


Рисунок 4.3 - Зона забруднення, t=36с

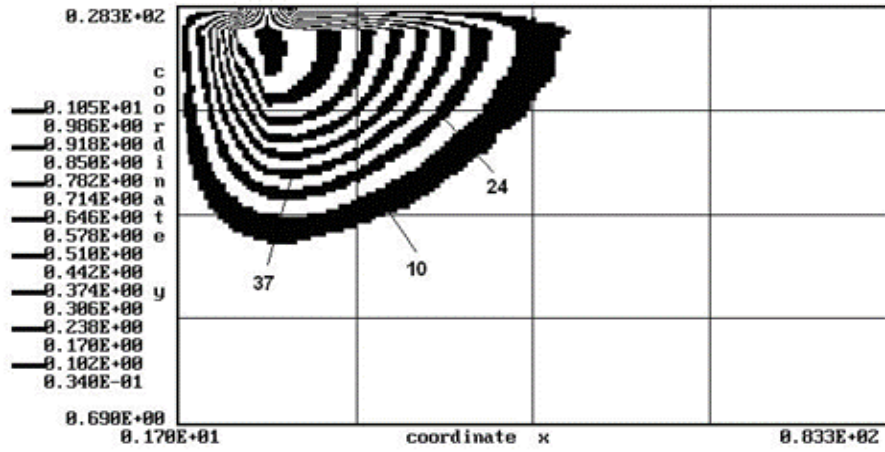


Рисунок 4.4- Зона забруднення,  $t = 44\text{c}$

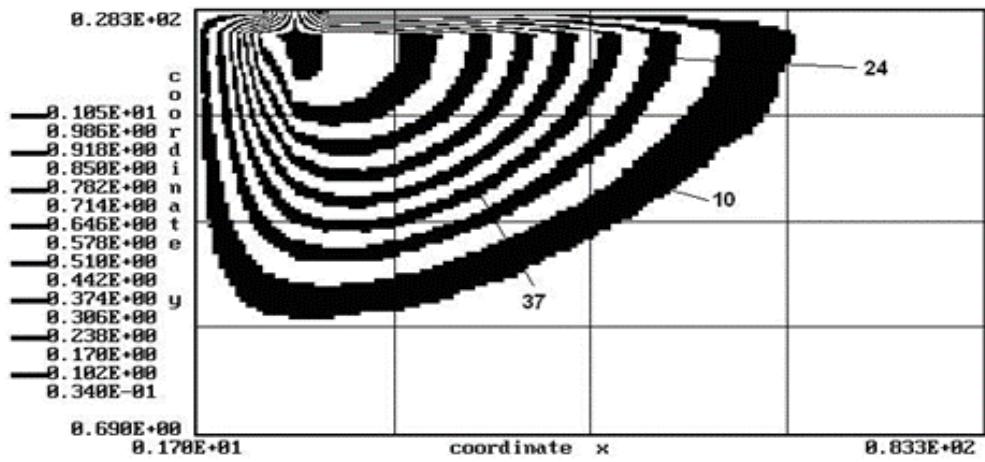


Рисунок 4.4 - Зона забруднення,  $t = 57\text{c}$

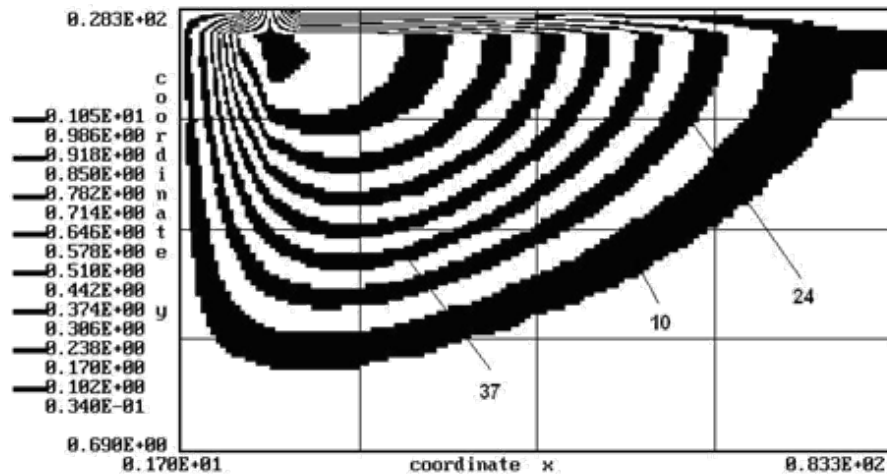


Рисунок 4.5 - Зона забруднення,  $t=88\text{c}$

Чітко видно, що зона забруднення, яка формується в акваторії річки, розгортається за рахунок взаємодії двох потоків по аналогії знесення вітром факела забруднювача, що виходить з гирла труби з певною швидкістю. Ми бачимо, що, в перші секунди після аварії, найбільш забрудненою є вода в річці у верхньому шарі акваторії. За рахунок течії в річці зона забруднення поширюється вдоволь русла та охоплює значну частину акваторії. Також ми бачимо значне забруднення акваторії в глибину: майже за 88 с після початку потрапляння аміаку в акваторію, зона забруднення досягає, практично, дна річки. Формування даної зони пов'язане з досить великою кінетичною енергією потоку аміаку, що входить в акваторію річки. Таким чином, при можливої аварії на мосту, де є аміакопровід, станеться інтенсивне забруднення акваторії р. Дніпро практично на всю глибину.

На закінчення відзначимо, що для розрахунку задачі знадобилося 10 скomp'ютерного часу, що дозволяє застосовувати побудовану модель для проведення серійних прогнозних розрахунків.

### 4.3. Прогнозування забруднення акваторії річки та атмосферного повітря при аварійному витокі аміака

Розглядається другий сценарій аварійного забруднення акваторії р. Дніпро. Це сценарій – коли частина труби аміакопроводу впала з моста та

потрапила в річку. Це може бути при «гільотивному» пошкодженні труби аміакопроводу та її падіння в річку внаслідок вибуху на мості. При такому сценарії надзвичайної ситуації в акваторії «створюється» «точкове» джерело забруднення (рис.4.6 , позиція 3).

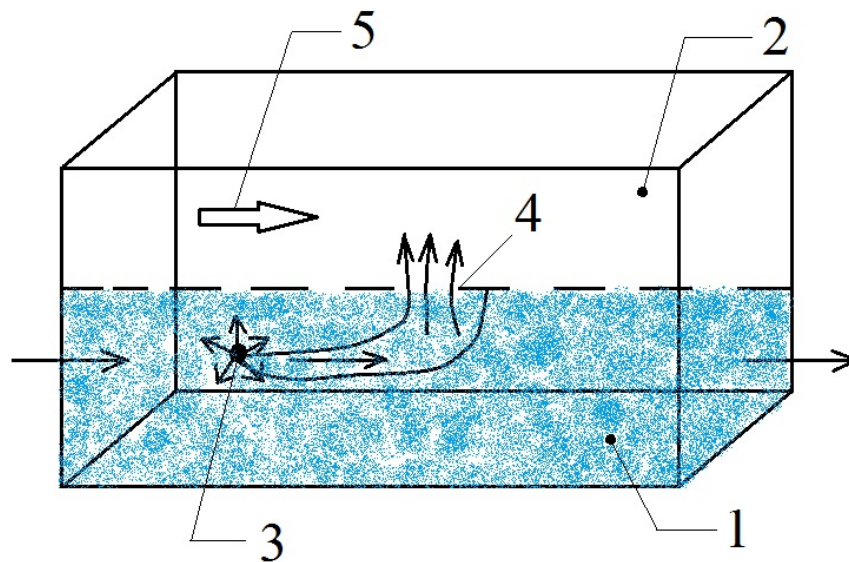


Рисунок 4.6 Схема розрахункової області:  
1- зона акваторії р. Дніпро; 2- зона атмосфери; 3- місце викиду аміаку;  
4 – місце виходу аміаку на поверхню р. Дніпро; 5- напрям вітру

Аміак, що потрапляє в акваторію на певній глибині, починає рухатися в акваторії внаслідок течії в річці, а далі, з часом шлейф забруднювача надходить до вільної поверхні та настає новий процес, а саме – формування плями на вільній поверхні та «виход» аміаку з плями в атмосферне повітря (рис.4.7).



Рисунок 4.7. Схема формування шлейфу аміаку над водною поверхнею

З труби аміакопроводу, яка впала в річку, аміак буде виходити у вигляді шлейфу бульбашок. Діаметр бульбашки, використовуючи гідравлічне наближення, можна розрахувати так

$$d = \sqrt{\frac{6d_0\sigma}{(\rho_v - \rho)g}},$$

Діаметр бульбашки, використовуючи гідравлічне наближення, можна розрахувати так

$$d = \sqrt{\frac{6d_0\sigma}{(\rho_v - \rho)g}},$$

де  $d_0$  – діаметр труби;  $\rho_v$  – щільність води;  $\rho$  – щільність газу;  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу.

З причини відсутності необхідних даних в літературі, при проведенні розрахунків, прийmemo  $\sigma=72,75 \cdot 10^{-3}$  н/кг;  $d_0=355$ мм;  $\rho_v=1000$ кг/м<sup>3</sup> ;  $\rho=0.7$ г/л.

Швидкість підняття газового бульбашки визначимо по емпіричній залежності/ Кравчук, с. 91 /:

$$\omega_s = \sqrt{gr_0}, \text{ [м/с]},$$

де  $r_0$  – радіус газової бульбашки.

Перенесення аміаку в водному та повітряному середовищі описується наступним рівнянням:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum q_i(t) \delta(r - r_i), \end{aligned} \quad (4.4)$$

де  $C$  – концентрація аміака;

$u, v, w$ - компоненти вектора швидкості середовища;

$\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – коефіцієнти турбулентної дифузії;

$t$  – час;

$\sigma$  – коефіцієнт, що враховує хімічний розпад;

$r_i = (x_i, y_i, z_i)$  – координати джерела викиду аміака;

$q_i$  – потужність викиду;

$\delta(r - r_i), \delta(r - r_j)$  – дельта-функція Дірака.

При використанні рівняння (4.4), для моделювання забруднення атмосферного повітря, компоненти вектора швидкості вітру визначаються за допомогою залежностей

$$\begin{aligned} u &= u_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^p, & \mu_z &= k_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^m, \\ \mu_x &= \mu_y = k_0 u, \end{aligned}$$

При використанні рівняння (4.4), для моделювання забруднення акваторії річки, потік вважається спрямованим вдовж вісі  $X$  (напрямок течії в річці), нерівномірне поле швидкості водного потоку визначається за допомогою залежності (4.1).

Розглянемо метод вирішення рівняння (4.4). Виконаємо наступне фізичне розщеплення цього рівняння при інтегруванні на часовому кроці  $dt$ :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial x} + \frac{\partial wc}{\partial z} = 0, \\ & \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial c}{\partial z} \right), \end{aligned}$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \sum q_i(t) \delta(r - r_i)$$

Далі, виконаємо наступну заміну похідних [33]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta t},$$

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

$$\frac{\partial w C}{\partial z} = \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z},$$

де  $u^+ = \frac{u + |u|}{2}$ ;  $u^- = \frac{u - |u|}{2}$ ,  $v^+ = \frac{v + |v|}{2}$ ;  $v^- = \frac{v - |v|}{2}$ ,  $w^+ = \frac{w + |w|}{2}$ ;

$$w^- = \frac{w - |w|}{2}.$$

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{ijk}^{n+1} - u_{ijk}^+ C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{ijk} - v_{ijk}^+ C_{i,j-1,k}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k} - v_{ijk}^- C_{ijk}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^+ C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{ijk} - w_{ijk}^+ C_{i,j,k-1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^- C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1} - w_{ijk}^- C_{i,j,k}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1}.$$

Другі похідні замінимо наступним чином[33]::

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \tilde{\mu}_{x_1} \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x^2} - \tilde{\mu}_{x_2} \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \tilde{\mu}_{y_1} \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta y^2} - \tilde{\mu}_{y_2} \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) &\approx \tilde{\mu}_{z_1} \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta z^2} - \tilde{\mu}_{z_2} \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{ij,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}, \end{aligned}$$

де  $\mu_{x_1} = \frac{2\mu_i \mu_{i+1}}{\mu_i + \mu_{i+1}}$  і т.д.[33].

В приведених формулах, для опису різницевої залежності, використовувалися позначення операторів  $L_x^+$ ,  $L_x^-$ ,  $L_y^+$ ,  $L_y^-$ ,  $L_z^+$ ,  $L_z^-$ ,  $M_{xx}^+$ ,  $M_{xx}^-$ , та таке інше [33].

З урахуванням наведених вище позначень різницевої операторів різницевої аналог рівняння переносу (2.10) можна записати так [33]:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + L_z^+ C^{n+1} + L_z^- C^{n+1} + \sigma C_{ijk}^{n+1} = \\ = \left( M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1} + M_{zz}^- C^{n+1} \right). \end{aligned}$$

Розщепимо рішення даного різницевого рівняння при інтегруванні на часовому інтервалі  $dt$  так:

– на першому кроці  $k = \frac{1}{4}$ :

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left( L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k \right) = \\ = \frac{1}{4} \left( M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n + M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^n \right); \quad (4.5) \end{aligned}$$

– на другому кроці  $k = n + \frac{1}{2}$ ;  $c = n + \frac{1}{4}$ :

$$\frac{C_{ijk}^k - C_{ijk}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left( L_x^- C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k \right) +$$

$$\frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c + M_{zz}^- C^k + M_{zz}^+ C^c); \quad (4.6)$$

– на третьому кроці  $k = n + \frac{3}{4}$ ;  $c = n + \frac{1}{2}$  використовується формула (4.6);

– на четвертому кроці  $k = n + 1$ ;  $c = n + \frac{3}{4}$  використовується формула

(4.5).

В дані різницеві співвідношення входить «обурений» коефіцієнт дифузії [33]:

$$\mu_{1x} = \frac{\mu_x}{1 + \frac{u^+ \Delta x}{\mu}}, \quad \mu_{2x} = \frac{\mu_x}{1 - \frac{u^- \Delta x}{\mu}}$$

та таке інше.

На п'ятому кроці розщеплення враховується вплив джерел на зміну концентрації домішки і розрахункова залежність на цьому кроці має вигляд:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \sum_{l=1}^N \frac{q_l(t^{n+1/2})}{\Delta x \Delta y \Delta z} \delta_l, \quad (4.7)$$

Функції  $\delta_l$  тотожне дорівнюють нулю, крім комірок, де розташоване l-е джерело забруднення. В цих комірках вона дорівнює  $\delta_l = 1$ . Відзначимо, що відокремлення процедури розрахунку концентрації аміака у вигляді залежності (4.7) є дуже важливим для рішення цієї комплексної задачі, а саме : «забруднення акваторії + забруднення атмосферного повітря». Процедура розрахунку (4.7) для вільної поверхні відноситься до комірок на вільній поверхні акваторії, де аміак «виходить» з річки в атмосферне повітря. Ці комірки є «з'єднанням» між зоною, що занята водою ( річка ) та зоною повітряного середовища. Так як в кожній комірці, що відноситься до граничних комірок на вільній поверхні відома концентрація аміака  $C_{ijk}$ , то на часовому кроці  $dt$  в кожній такої комірці розраховується інтенсивність потрапляння аміаку в атмосферу:  $q_l = C_{ijl} \omega_s S$ , де  $S = h_x h_y$  - площа

розрахункової комірки на вільній поверхні;  $\omega_s$  - швидкість підйому аміаку в акваторії річки. Ця інтенсивність  $q_l$  є різною для різних участках вільної поверхні так як є різною значення концентрації аміаку в різних точках поверхні.

Початкова умова для кожного рівняння розщеплення, записується так :

$$\begin{aligned} C \Big|_{t=t^n}^1 &= C(x, y, z, t^n) \\ C \Big|_{t=t^n}^k &= C \Big|_{t=t^{n+1}}^{k-1}, \quad k = 2, 3, 4 \\ C(x, y, z, t^{n+1}) &= C \Big|_{t=t^{n+1}}^5, \end{aligned}$$

де  $C^1, C^k, C^5$  - значення концентрації домішки аміаку на тому чи іншому розрахунковому кроці.

Розрахунок невідомого значення концентрації аміака формулами (4.5), (4.6) здійснюється за явною формулою «рахунку, що біжить». Відзначимо, що алгоритм рішення даної задачі такий:

1. Задаються дані, що до фізичних параметрів задачі (положення отвору труби в акваторії, швидкість течії та таке інше).
2. Здійснюється розрахунок поширення аміаку в акваторії річки та визначається розподіл концентрації забруднювача в річці.
3. Визначається зона, де аміак «підходить» до вільної поверхні. В цій зоні, та визначається інтенсивність «випарювання» аміака з вільної поверхні до атмосфери - параметр  $q_l$ .
4. Розраховується поширення аміаку в атмосфері при «випарювання» аміака з вільної поверхні.

5. Виконується друк полів концентрації аміака в річці та в атмосфері.

Таким чином, на базі розробленої моделі ми отримуємо, одночасно, зони забруднення як в акваторії так і в атмосферному повітрі. Комп'ютерна

реалізація здійснюється за допомогою розробленого коду «DNIPRO». Мова програмування – FORTRAN. Структура коду:

1. підпрограма типу SUBROUTINE «DN1» - 3D розрахунок процесу поширення аміаку в р. Дніпро.
2. підпрограма типу SUBROUTINE «DN2» - 3D розрахунок процесу поширення аміаку від вільної поверхні річки в атмосферному повітрі.
3. підпрограма типу SUBROUTINE «DN3» - реалізація граничних умов.
4. підпрограма типу SUBROUTINE «DN4» - розрахунок інтенсивності емісії.
5. підпрограма типу SUBROUTINE «DN5» - друк результатів прогнозування.

Результати прогнозування, які одержани за рахунок побудованої моделі та розробленого комп'ютерного коду показані нізче. При рішенні задачі використовувалися вихідні дані, що наведені в попередньому параграфі. Приймається, що отвір труби аміакопроводу знаходиться в акваторії біля дна, тобто на глибині 28м. Отвір має площу  $S=0,096 \text{ м}^2$ . Також використовуються наступні дані, що до параметрів атмосфери: швидкість вітру на висоті 10м – 3м/с, напрям вітру – вдовж напрямку течії в річці (тобто, вдовж вісі  $X$ ). Розміри розрахункової області 900м\*700м\*120м. Інтенсивність емісії аміаку з отвору труби визначається за допомогою моделі, що розглянута в розділі 2.2 при тих же вхідних даних – тобто, при прогнозуванні враховується суттєво нестационарний викід аміаку з труби (зниження тиску в трубі з часом). Але, слід відзначити, що для даної задачі враховується те, що тут виток аміака має місце в середовищі з надлишковим тиском (викід біля дна річки де надлишковий тиск є біля 3атм). Тому, при визначенні витрати аміаку в формулі (2.2) задається величина тиску, яка менш чим тиск в аміакопроводі на 3атм. Комп'ютерна програма, що реалізує рішення даної задачі використовує додатково код « VOV3D.exe» для розрахунку нестационарного процесу виток аміака (розділ 2).

На рисунках нізче наведена зона забруднення акваторії для різних моментів часу. Ізолінії концентрації аміака ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), для кращого сприйняття наведені в перерізі ХОУ, тобто, в горизонтальній площині. Відзначимо, що значенню  $z=0$  – відповідає дно річки. Розміри ділянки, що на рисунках:  $350\text{м} \times 250\text{м}$ .

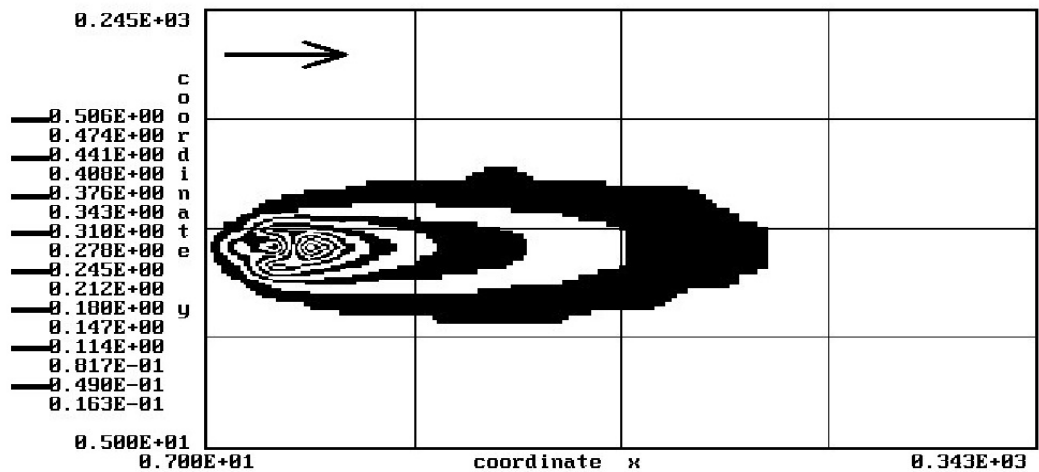


Рисунок -4.8 Зона забруднення акваторії на глибині 28м,  $t=69\text{с}$ ;

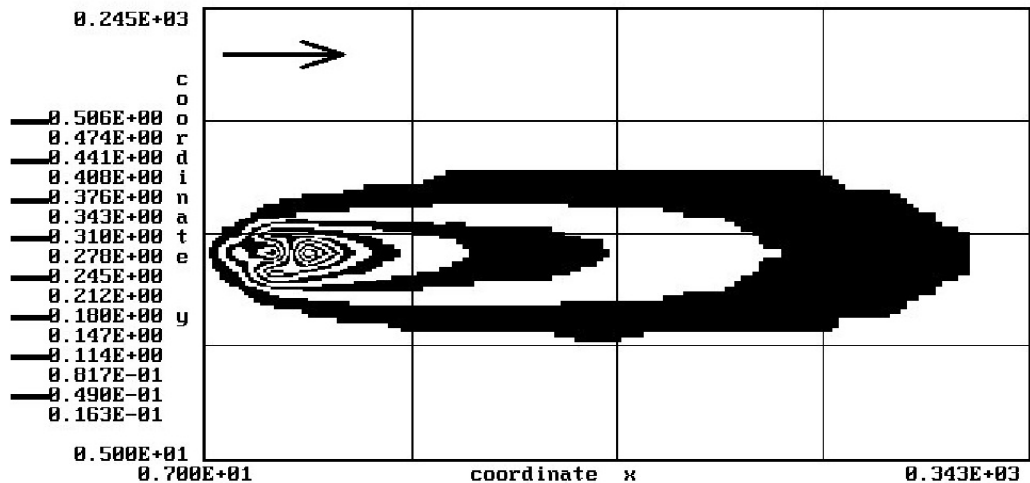


Рисунок -4.9 Зона забруднення акваторії на глибині 28м,  $t=99\text{с}$ ;

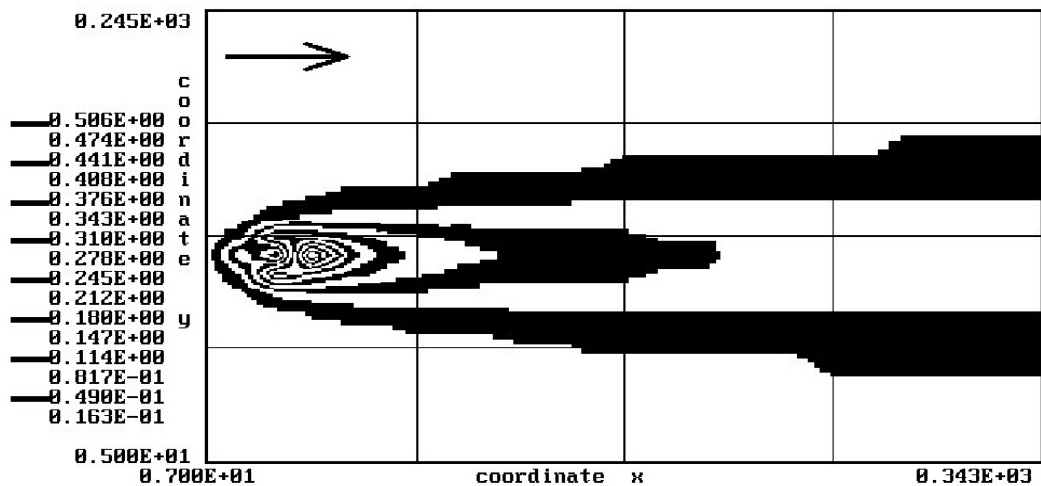


Рисунок -4.10 Зона забруднення акваторії на глибині 28м,  $t=212с$ ;

На рис.4.11 показана зона забруднення акваторії на іншій глибині -0.6м, тобто, поблизу вільної поверхні.

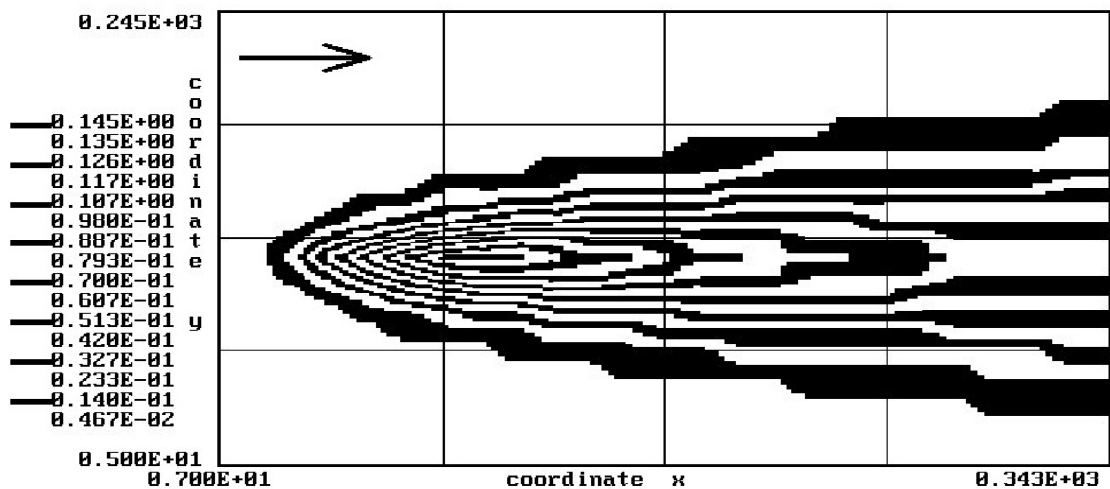


Рисунок -4.11 Зона забруднення акваторії на глибині 0.6м,  $t=212с$ ;

Якщо порівняти рис.4.10 та рис.4.11, ми бачимо, що зона забруднення біля вільної поверхні має більш «розряджений» вигляд, а зона забруднення біля дна – має значні градієнти концентрації, що обумовлено впливом джерела забруднення, яке розтошована поблизу дна річки. Дані результати свідчать про те, що у випадку реалізації даного сценарію аварійної ситуації на мосту, акваторія р. Дніпро буде забруднена по всій глибині. Це

обумовлено такими факторами: дуже інтенсивним потраплянням аміака в акваторію з труби під тиском; турбулентним перемішуванням води; підйомом аміака до вільної поверхні. Розрахунки показали, що на момент часу активної емісії аміака з трубопроводу (порядку 200с ) зона забруднення , біля дна, буде мати довжину порядку 340м, ширину – порядку 240м (в площині XOY).

З рис. 4.11 ми бачимо, що з часом, біля вільної поверхні формується зона забруднення. З цієї зони аміак починає потрапляти в атмосферу. Далі, показана зона забруднення атмосферного повітря для різних моментів часу над вільною поверхнею річки

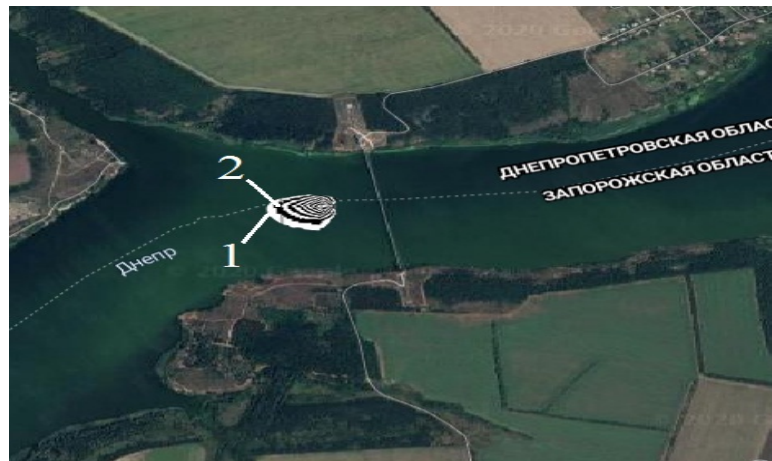


Рисунок 4.12 - Зона забруднення атмосферного повітря на висоті 2м над акваторією,  $t=4.2\text{хв}$  (випарювання аміаку з акваторії):1-  $C= 1.2\text{г/м}^3$ ; 2-  $C= 4.2\text{г/м}^3$

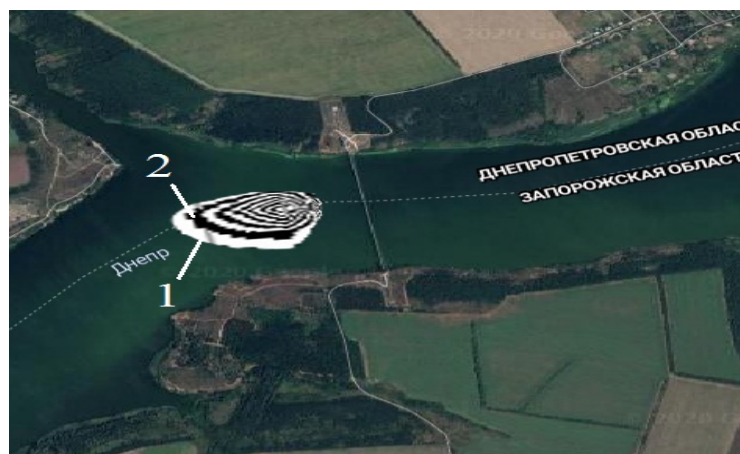


Рисунок 4.13 Зона забруднення атмосферного повітря на висоті 2м над акваторією,  $t=8.7$  хв (випарювання аміаку з акваторії); 1-  $C= 11\text{г}/\text{м}^3$ ; 2-  $C= 19\text{г}/\text{м}^3$

Далі, на рис.4.14 показана зона забруднення атмосферного повітря в перерізі  $y=360\text{м}$ . Значення параметрів на даному рисунку такі:  $L_z = 60\text{м}$ ,  $L_{xo} = 110\text{м}$ ;  $L_{xx} = 320\text{м}$ . Стрілка знизу на рисунку показує напрям течії в річці.

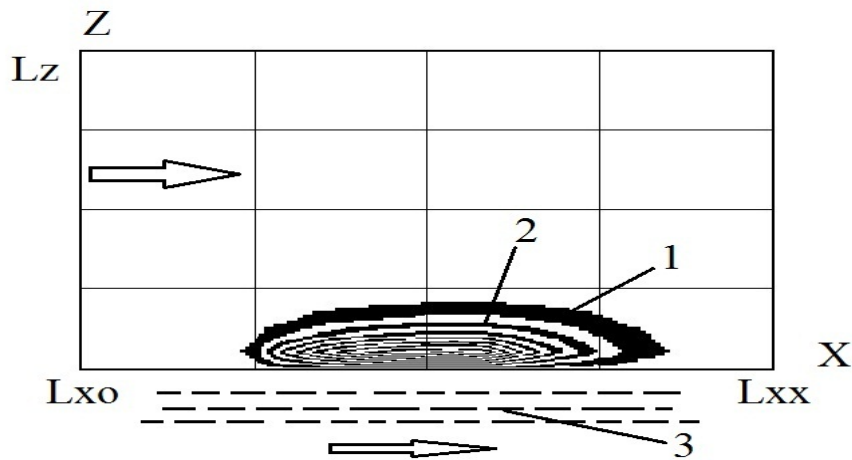


Рисунок 4.14 Зона забруднення атмосферного повітря на висоті над акваторією,  $t=4.7\text{хв}$  (випарювання аміаку з акваторії); 1-  $C= 5 \text{г}/\text{м}^3$ ; 2-  $C= 13\text{г}/\text{м}^3$ ; 3 – акваторія річки

З рис.4.14 ми бачимо, що над вільною поверхнею формується зона забруднення у вигляді хмари, що здійснює підйом над акваторією річки. Зона забруднення е дуже інтенсивною.

## **Висновки**

1. Виконано аналіз типів забруднення водних ресурсів.
2. Побудована математична модель прогнозування забруднення акваторії річки при аварійному скиді забруднювача.
3. Виконан прогноз динаміки забруднення акваторії р.Дніпро при аварійному потраплянні аміаку в річку.
4. Результати обчислювального експерименту показують, що в наслідок можливої аврії буде істотне забруднення акваторії р. Дніпро- важливого джерела водопостачання.

### Список використаних літератури :

1. А.с. 1353463 СССР, МКИ В 01 D 21/24. Отстойник / С.И. Эпштейн, В.И. Куклич, З.С. Музыкаина, Г.С. Пантелют, И.Н. Шабдаш, Л.В. Парина. – № 3947659/22-26; заявл. 29.08.85; опубл. 23.11.87, Бюл. №43
2. А.с. 1710517 СССР, МКИ С 02 F 1/40, В 01 D 21/00. Тонкослойный отстойник / А.А. Абдураманов, Г.К. Егимбердиева. – № 4817148/26; заявл. 20.02.90; опубл. 07.02.92, Бюл. №5.
3. А.с. 1722528 СССР, МКИ В 01 D 21/08, С 02 F 1/52. Аппарат для осветления воды / Ю.А. Галкин, Л.Л. Кочнев, Г.С. Пантелют, С.Е. Никулин, А.Н. Царенко. – № 4853435/26; заявл. 19.07.90; опубл. 30.03.92, Бюл. №12.
4. Абрамов, Н.Н. Водоснабжение / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1982. – 440 с.
5. Авраменко, М.И. О  $k - \varepsilon$  модели турбулентности / М.И. Авраменко. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2005 – 76 с.
6. Бабенко, С.П. Тонкошаровий елемент удосконаленої конструкції для видалення з води завислих речовин: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація» / С.П. Бабенко. – Харків: ХНУБА, 2014. – 22 с.
7. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках [монографія] / Н. Н. Беляев, В. А. Козачина. – Д.: Акцент ПП, 2015. – 115 с.
8. Беляев, Н.Н. Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения [монографія] / Н.Н. Беляев, Е.К. Нагорная. – Д.: Нова ідеологія, 2012. – 112 с.
9. Козачина В.А. Математическое моделирование работы горизонтального отстойника / Н.Н. Беляев, В.А. Козачина // Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур. Присвячено 100-річчю створення Харківської каналізації: VI всеукраїнський науковий семінар, 15-16 жовтня 2014 р., м. Харків: тези за матеріалами. – Харків: ХНУБА, 2014. – С. 22-24.

10. Беляев, Н.Н. Моделирование процесса осветления воды в отстойниках / Н.Н. Беляев, В.А. Козачина, О.В. Полубинская // Проблемы та перспективи розвитку залізничного транспорту: 75 міжнародна науково-практична конференція, 14-15 травня 2015 р, м. Дніпро: тези за матеріалами. – Д.: ДНУЗТ, 2015. – С. 313.

11. Беляев, Н.Н. Моделирование процесса очистки шахтных вод в горизонтальных отстойниках / Вісник Дніпропетровського національного університету. Серія Механіка. – Д.: ДНУ, 2015. – № 19. – С. 70-78.

12. Беляев, Н.Н. Снижение техногенной нагрузки на водоем при сбросе сточных вод за счет повышения эффективности отстойников / Н.Н. Беляев, Л.Ф. Долина, В.А. Козачина // Електромагнітна сумісність і безпека на залізничному транспорті. Науковий журнал. – Д.: ДНУЗТ, 2012. – Вып. №3. – С. 92-97.

13. Беляев, Н.Н. Усовершенствованная методика расчета горизонтального отстойника / Н.Н. Беляев, В.А. Козачина // Актуальні проблеми систем теплогазопостачання і вентиляції, водопостачання і водовідведення. Присвячено 50-річчю кафедри теплогазопостачання, вентиляції та санітарної техніки НУВГП: міжнародна науково-технічна конференція, 11-13 березня 2015 р., м. Рівне: тези за матеріалами. – Рівне: НУВГП, 2015. – С. 92-93.

14. Беляев, Н.Н. Численное исследование процесса осветления воды в горизонтальных отстойниках / Н.Н. Беляев, В.А. Козачина // Проблемы та перспективи розвитку залізничного транспорту: 74 міжнародна науково-практична конференція, 15-16 травня 2014 р, м. Дніпро: тези за матеріалами. – Д.: ДНУЗТ, 2014. – С. 315-316.

15. Беляев, Н.Н. Численное моделирование процесса осветления шахтных вод в горизонтальном отстойнике / Н.Н. Беляев, Е.Ю. Гунько, В.А. Козачина // Геотехнічна механіка. Міжвідомчий збірник наукових праць. – К.: Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, 2014. – № 114 – С. 240-250.

16. Беляєв, Н.Н. CFD моделювання процесу формування осаду в горизонтальному відстійнику / Н.Н. Беляєв, В.А. Козачина // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. – №3 (81). – С. 222-225.

17. Беляєв, Н.Н. CFD моделювання процесу формування осаду в горизонтальному відстійнику / Н.Н. Беляєв, В.А. Козачина // Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд. Присвячено 85-річчю ХНУБА: VII міжнародна наукова конференція, 20-21 жовтня 2015 р., м. Харків: тези за матеріалами. – Харків: ХНУБА, 2015. – С. 14-15.

18. Беляєв, Н.Н. CFD моделювання роботи горизонтального двохетажного відстійника з поворотом потоку в вертикальній площині / Н.Н. Беляєв, В.А. Козачина // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Д.: НГУ, 2014. – №45. – С. 152-157..

19. Беляєв, Н.Н. CFD моделювання роботи горизонтального відстійника со струєнаправляючими пластинами / Беляєв Н.Н., Козачина В.А // Вода та водоочисні технології. Науково-технічні вісті. – К., 2014. – №2 (15) – С. 50-55.

20. Василенко А.И. Проектирование канализации населенных мест / А.И. Василенко, А.А. Василенко. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – К.: Будівельник, 1985. – 136 с.

21. Василенко, О.А. Водовідведення та очистка стічних вод міста. Курсове і дипломне проектування. Приклади та розрахунки: Навчальний посібник / О.А. Василенко, С.М. Епоян – Київ, Харків: КНУБА, ХНУБА, ТО Ексклюзив, 2012. – 540 с.

22. Водовідведення і очищення стічних вод міста. Навчальний посібник / [С.М. Епоян, Г.М. Смірнова, І.В. Корінько, С.П. Пашкова, В.Ю. Сорокіна, Г. Вевелер]. – Харків: Видавнича група «РА Каравела», 2003. – 144 с.

23. Водоотведение и очистка сточных вод. Учебник для вузов / [С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, В.И. Калицун]. – М.: Стройиздат, 1996. — 591 с.
24. Водопостачання (очистка природних вод) / С.М. Епоян, Г.І. Сухоруков, О.Г. Друшляк, В.В. Шилін. Навчальний посібник – Харків, ХДТУБА, 2001. – 191 с.
25. Водопостачання та очистка природних вод. Навчальний посібник / С.М. Епоян, В.Д. Колотило, О.Г. Друшляк, Г.І. Сухоруков, Т.С. Айрапетян. – Х.: Фактор, 2010. – 192 с.
26. Воронов, Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод: Учебное пособие / Ю.В. Воронов. - М.: Издательство Ассоциация строительных вузов, 2009. – 760 с.
27. Гарбарук, А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
28. Гнедин, К.В. Режим работы и гидравлика горизонтальных отстойников / К.В. Гнедин. – Київ: Вид-во «Будівельник», 1974. – 223 с.
29. Гуревич, М. И. Теория струй идеальной жидкости / М.И. Гуревич. – М.: Наука, 1979. – 536 с.
30. Давидян, М.А. Моделирование работы тонкослойного отстойника с каналами для отвода осадка при очистке воды хозяйственно-питьевого назначения / Давидян М.А // Науковий вісник будівництва: збірник наукових праць. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010 – Вип. 60. – 5 с.
31. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування / К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – 2013. – 172 с.
32. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування / К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – 2013. – 128 с.

33. Демура, М.В. Проектирование тонкослойных отстойников / М.В. Демура – К.: Будівельник, 1981. – 50 с.

34. Душкин, С.С. Разработка научных основ ресурсосберегающих технологий подготовки экологически чистой питьевой воды / С.С. Душкин, Г.И. Благодарная. – Харьков: ХНАГХ, 2009. – 95 с.

35. Епоян, С.М. Використання активованих розчинів коагулянтів сульфату алюмінію в процесах підготовки питної води / С.М. Епоян, С.С. Душкін // Досягнення та перспективи розвитку водогосподарської галузі: до 100-річчя від дня народження Гаркуші М.А. – першого міністра меліорації і водного господарства України, Державне агентство водних ресурсів України, міжнар. наук.-практ. конф., 11-12 вересня 2014: тези за матеріалами – К., 2014. – С. 97-100.

36. Епоян, С.М. До розрахунку горизонтального відстійника з пористою полімербетонною перегородкою систем господарсько-питного водопостачання / С.М. Епоян, Д.Г. Сухоруков // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. – 2012. – Вип. 68. – С. 244-248.

37. Епоян, С.М. Імпульсна промивка пористої перегородки горизонтального відстійника / С.М. Епоян, Д.Г. Сухоруков // 71-а наук.-техн конф., 15-17 березня 2016, м. Харків: тези за матеріалами. – Харків: ХНУБА. – 2016. – С.40.