



БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 648.543

<https://doi.org/10.31713/vt220251>

Ковальчук В. А. ^[1: ORCID ID: 0000-0002-4098-7802],

д.т.н., професор,

Онісімчук В. С.,

магістр

¹Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ДИСПЕРСНИЙ СКЛАД НЕРОЗЧИННИХ ДОМІШОК МІСЬКИХ СТІЧНИХ ВОД

Властивості та характеристики окремих частинок відіграють важливу роль у процесах очищення стічних вод. Питома поверхня, густина, форма, розмір і ступінь агломерації частинок визначають седиментаційні властивості зависі. На сьогодні існує чимало методів для визначення розмірів частинок. Усі вони дають змогу оцінити їх розмір, ґрунтуючись на одній із властивостей частинок, наприклад, здатності розсіювати чи блокувати лазерний промінь, змінювати електричний опір отвору, при проходженні через нього, осідати під дією сили тяжіння чи відцентрових сил, розсіювати акустичний сигнал тощо. Для визначення дисперсного складу в цій роботі було вирішено поєднати цифровий USB-мікроскоп з подальшою обробкою отриманих зображень на комп'ютері. Цей метод є досить простим у виконанні, дозволяє визначити не лише розмір частинок, але й оцінити їх форму та має досить великий діапазон вимірювань. У роботі визначено дисперсний склад зависі неочищених міських стічних вод на вході в міські очисні споруди та на вході і виході з первинних відстійників. Досліджено взаємозв'язок між концентрацією завислих речовин та медіанним діаметром частинок стічних вод і логарифмом їх середньоквадратичного відхилення.

Ключові слова: міські стічні води; дисперсний склад нерозчинних домішок; медіанний діаметр; еквівалентний діаметр; логарифм середньоквадратичного відхилення.

Вступ. У процесах очищення стічних вод властивості та характеристики окремих частинок відіграють важливу роль [1–3]. Питома поверхня, густина, форма, розмір і ступінь агломерації частинок визначають, зокрема, седиментаційні властивості зависі. **Метою роботи було** визначити дисперсний склад міських стічних вод, стічних вод на вході та виході з первинних відстійників, а також дослідити залежність між медіанним діаметром частинок та

середньоквадратичним відхиленням від концентрації завислих речовин для неочищених міських стічних вод та стічних вод на вході та виході з первинних відстійників.

Матеріали та методи. Сучасні методи визначення дисперсного складу частинок умовно можна поділити на 3 класи: методи групового аналізу частинок, методи індивідуального підрахунку частинок, методи розділення частинок за розмірами [4–6].

При застосуванні методів групового аналізу визначають розміри всіх частинок, які містяться у пробі в певний момент часу, після чого отримані дані обробляються з метою отримання розподілу розмірів частинок. До них належать такі методи, як розсіювання малокутового лазерного світла, кореляційної фотонної спектроскопії, спектроскопії зворотного розсіювання тощо.

Методи індивідуального підрахунку частинок дозволяють водночас встановити розмір однієї частинки, а отримані дані накопичуються для встановлення розподілу частинок за розмірами. Для підрахунку частинок цим методом використовують такі пристрої, як-от електронний лічильник, світловий лічильник, оптичний та електронний мікроскоп тощо.

У всіх розділювальних методах до частинок застосовуються зовнішні сили, які забезпечують фізичне розділення частинок відповідно до їх розмірів. До них належать такі методи, як фільтрування через пористі мембрани, дискові центрифуги, гравітаційна седиментація тощо.

З огляду на широкий діапазон розмірів частинок поміж усіх перелічених методів лише деякі можуть використовуватися для визначення дисперсного складу міських стічних вод. До них належать такі методи: розсіювання малокутового лазерного світла, спектроскопії зворотного розсіювання, електронний та світловий лічильники, оптичний та електронний мікроскоп, гравітаційна седиментація.

Серед методів, в яких передбачається застосування лазерного світла, точність вимірювань буде вища при використанні методу розсіювання малокутового лазерного світла, однак цей метод може використовуватися лише для проб з відносно низькими концентраціями частинок з метою підвищення точності вимірювань та запобігання багаторазовому розсіюванню. Крім того, прилади для досліджень частинок таким методом, а також методи із застосуванням світлових лічильників мають дуже високу вартість.



Найбільш простими є методи гравітаційної седиментації та підрахунку кількості частинок за допомогою оптичного чи електронного мікроскопа. Однак метод гравітаційної седиментації не дозволяє точно вимірювати частинки розміром менше 0,2–1 мкм, також труднощі виникають з визначенням великих частинок у зв'язку із виникненням навколо них у процесі осідання турбулентного потоку, а тривалість проведення аналізу може бути дуже значною – до 12 або більше годин.

Кількість частинок, порохованих за допомогою оптичного мікроскопа, зазвичай мала у порівнянні з іншими методами підрахунку, що зменшує репрезентативність дослідження. Однак, цей метод може успішно застосовуватися для дослідження дисперсного складу стічних вод за умови поєднання оптичного чи цифрового USB-мікроскопа з подальшою обробкою отриманих зображень оптичних полів на комп'ютері, що дозволить суттєво спростити та зменшити тривалість визначення дисперсного складу та збільшити репрезентативність досліджень [7].

Дослідження дисперсного складу стічних вод за допомогою цифрового USB-мікроскопа виробництва Китаю (рис. 1) полягає в дослідженні зразка стічної води під мікроскопом із подальшою обробкою отриманих зображень на комп'ютері. Використовувався цифровий USB-мікроскоп зі збільшенням у 160 разів, оскільки еквівалентні діаметри частинок міських стічних вод знаходилися у діапазоні 0,01–100 мкм.

Суть методу полягає в тому, що на предметне скло наноситься близько 0,1 мл стічної води за допомогою піпетки з відбитим носиком, рівномірно розподіляється по ньому та висушується. Для дослідження дисперсного складу цим методом допускається використання нерозбавленої стічної води, якщо концентрація завислих речовин становить менше 300 мг/дм³, при більших значеннях рекомендується розбавляти пробу стічної води для уникнення накладання частинок одна на одну в процесі нанесення на предметне скло. Далі за допомогою цифрового USB-мікроскопа фотографуються оптичні зображення проби. Потрібно зробити не менше 10 знімків різних оптичних полів одного зразка стічної води для забезпечення достовірності отриманих результатів. Замість цифрового USB-мікроскопа можна використовувати оптичний мікроскоп та фотокамеру. Отримані зображення у форматі «.jpg» за допомогою програми «Фотоконвертер Стандарт» переводяться у векторні, формату «autocad.dwg». За допомогою AutoCAD 2018 та

програми написаної мовою DELPHI, підраховується кількість, площа та периметр кожної частинки, яку описує замкнена полілінія. Після визначення еквівалентних діаметрів частинок визначається маса кожної частинки та будуються інтегральні криві дисперсного складу за повними проходами та повними залишками в імовірнісно-логарифмічній системі координат із метою визначення медіанного діаметра і середньоквадратичного відхилення. Густина частинок за висі визначалася пікнометричним способом.

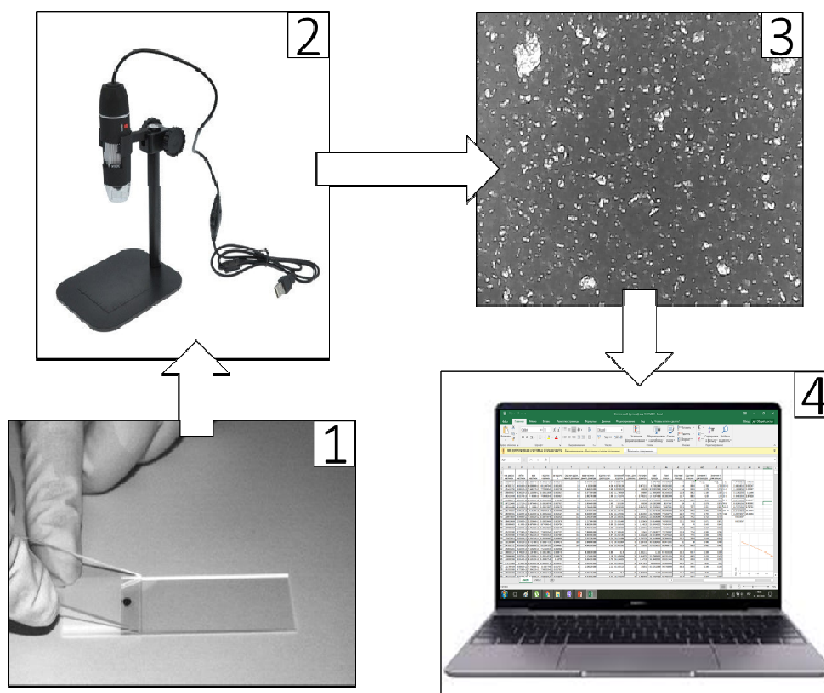


Рис. 1. Визначення дисперсного складу стічних вод за допомогою цифрового USB-мікроскопа з подальшим застосуванням системи аналізу оптичних зображень на комп'ютері:
1 – нанесення зразка стічної води на предметне скло; 2 – цифровий USB-мікроскоп; 3 – оптичне поле мікроскопа; 4 – комп'ютер з пакетом необхідних програм

Результати досліджень. Дослідження дисперсного складу проводилося у пробах неочищених стічних вод, що надходять на очисні споруди м. Рівне, а також у пробах стічних вод на вході та виході з первинних горизонтальних відстійників.

Як показали результати досліджень, концентрація завислих речовин на вході в очисні споруди знаходиться в межах 180–250 мг/дм³. Встановлено, що кількість частинок в 1 дм³ досліджуваних стічних вод в середньому становить $4,2 \cdot 10^{13}$. Еквівалентні діаметри частинок забруднень вхідної води знаходяться в діапазоні 0,01–60 мкм.



Із рис. 2 слідує, що за масою частинки розміром менше 1 мкм складають лише 1–3% від загальної маси частинок, а переважна кількість частинок за масою знаходиться в діапазоні 20–74 мкм. Медіанний діаметр частинок в середньому становить 33 мкм, та коливається в межах 15–45 мкм залежно від концентрації завислих речовин та часу відбору проб. Середнє значення логарифма середньоквадратичного відхилення становить 0,55 мкм та коливається у відносно невеликих межах.

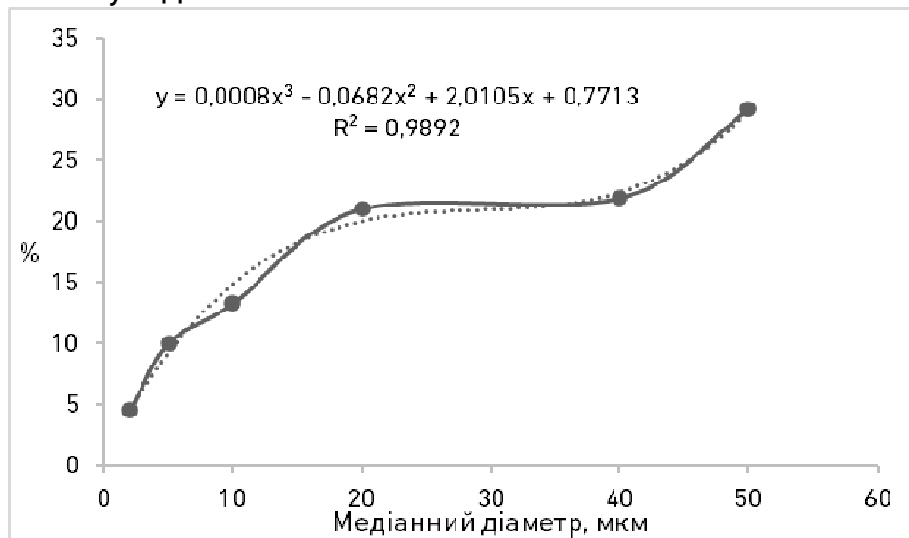


Рис. 2. Ваговий розподіл частинок стічної води на вході в очисні споруди

Вміст завислих речовин у стічних водах, що надходять на очистку у первинні відстійники (після решіток і піскоуловлювачів) знаходиться в межах 150–250 мг/дм³. Встановлено, що кількість частинок в 1 дм³ досліджуваних стічних вод в середньому становить $3,6 \cdot 10^{13}$. Еквівалентні діаметри частинок забруднень стічної води знаходяться в діапазоні 0,01–58 мкм (рис. 3).

Як і для випадку з вхідними міськими стічними водами (рис. 3), переважна кількість частинок за масою знаходиться в діапазоні 15–50 мкм і лише 1–6% від загальної маси становлять частинки розміром менше 1 мкм. Медіанний діаметр частинок в середньому становить 22 мкм, та коливається в межах від 9 до 37 мкм залежно від концентрації завислих речовин та часу відбору проб. Середнє значення логарифма середньоквадратичного відхилення становить 0,51 мкм.

На виході із первинних відстійників концентрація завислих речовин у міських стічних водах знаходиться в межах 87–173 мг/дм³. Встановлено, що кількість частинок в 1 м³ досліджуваних стічних вод в середньому становить $2,9 \cdot 10^{10}$. Еквівалентні діаметри частинок

забруднень стічної води становлять 0,01–47 мкм.

З рис. 4 слідує, що за масою частинки менше 1 мкм складають 1–7% від загальної маси частинок, а переважна кількість частинок за масою має розмір 7–47 мкм. Медіанний діаметр частинок в середньому становить 17 мкм, та коливається в межах від 4,6 до 30 мкм залежно від концентрації завислих речовин та часу відбору проб. Середнє значення логарифма середньоквадратичного відхилення становить 0,51 та коливається у відносно невеликих межах.

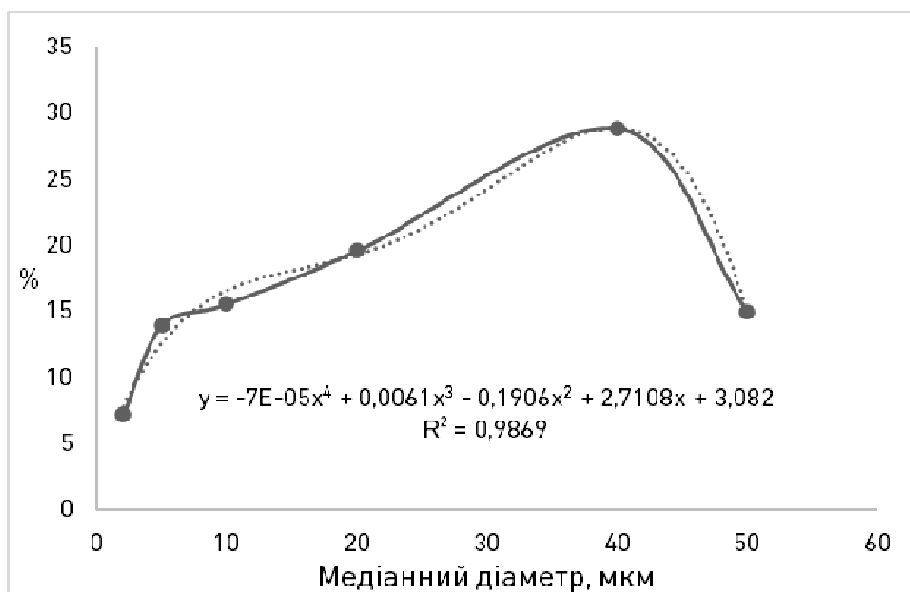


Рис. 3. Масовий розподіл частинок стічної води на вході в первинні відстійники

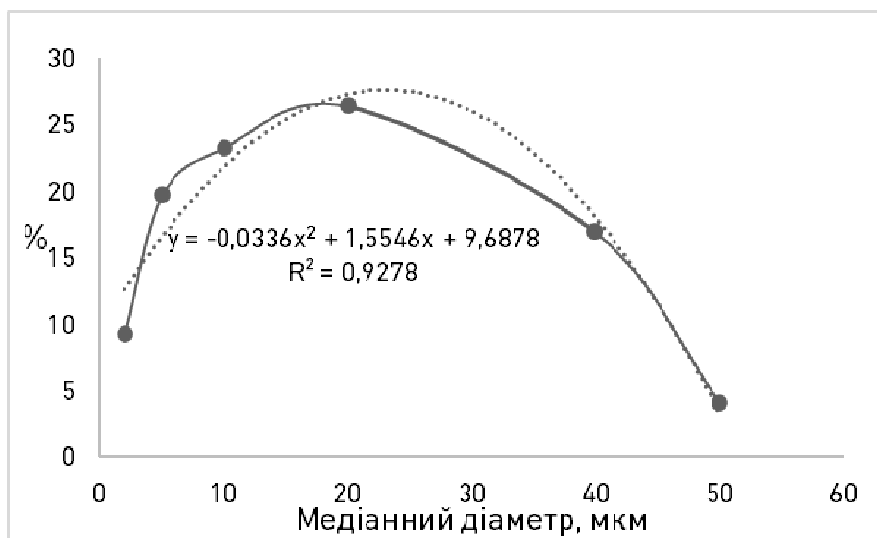


Рис. 4. Масовий розподіл частинок стічної води на виході з первинних відстійників



Встановлена залежність між концентрацією завислих речовин та медіанним діаметром частинок (рис. 5).

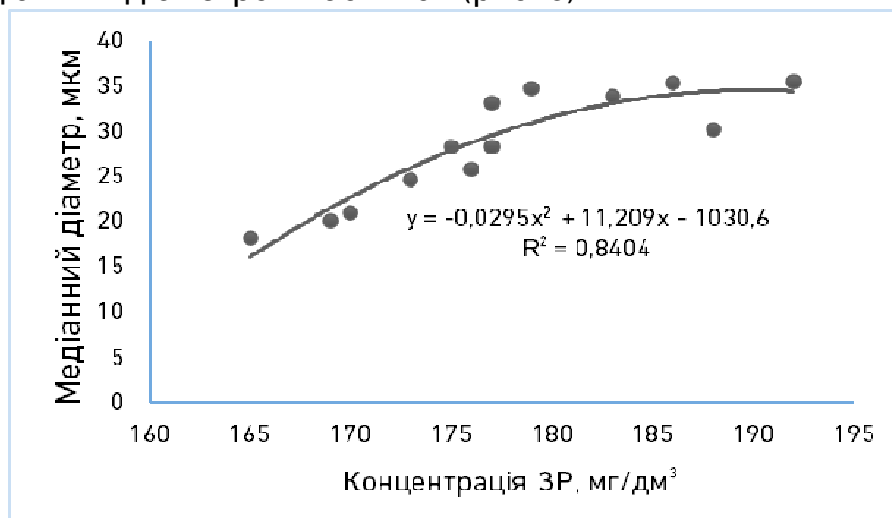


Рис. 5. Залежність концентрації завислих речовин та медіанного діаметра частинок для міських стічних вод

Залежність між концентрацією завислих речовин та медіанним діаметром частинок для стічних вод на вході в очисні споруди має наступний вигляд:

$$y = -0,0295 \cdot x^2 + 11,209 \cdot x - 1030,6, \quad (1)$$

де y – медіанний діаметр частинок, мкм;

x – концентрація завислих речовин, мг/дм³.

Аналогічна залежність для стічних вод на вході в первинні відстійники має наступний вигляд (рис. 6):

$$y = 0,255 \cdot x - 27,385. \quad (2)$$

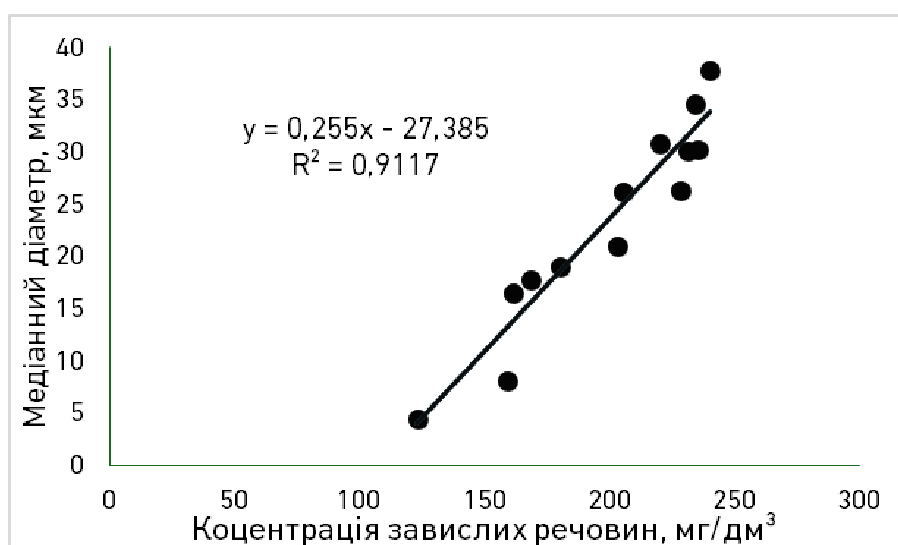


Рис. 6. Залежність медіанного діаметра частинок від концентрації завислих речовин в стічних водах на вході у первинні відстійники

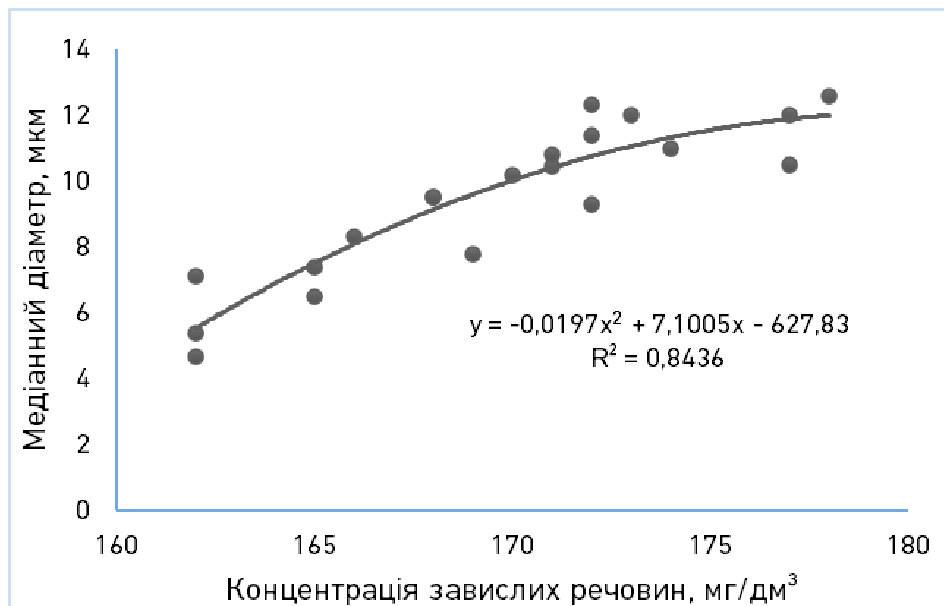


Рис. 7. Залежність медіанного діаметра частинок від концентрації завислих речовин в стічних водах на виході з первинного відстійника

Для стічних вод на виході з первинних відстійників залежність між концентрацією завислих речовин та медіанним діаметром частинок описується рівнянням (рис. 7):

$$y = -0,0197 \cdot x^2 + 7,1005 \cdot x - 627,83. \quad (3)$$

Хоча встановлені залежності 3.1, 3.2, 3.3 мають достатньо хороші значення відтворюваності результатів вони потребують подальшого дослідження з метою збільшення дослідної бази, підвищення достовірності результатів та апробації цих моделей.

Висновки. В результаті проведених досліджень отримані такі середні значення медіанних діаметрів частинок зависі:

- для стічних вод, що надходять на очисні споруди – 33 мкм;
- для стічних вод на вході в первинні відстійники – 22 мкм;
- для стічних вод на виході з первинних відстійників – 17 мкм.

Отримані значення медіанних діаметрів коливаються у відносно невеликому діапазоні залежно від концентрації завислих речовин та часу відбору проб стічної води.

У дослідженнях спостерігалися випадки незначного збільшення медіанного та еквівалентних діаметрів частинок у процесі очистки в первинних відстійниках. Це пов'язане з тим, що в процесі осадження частинки можуть агломеруватися і таким чином збільшувати свій еквівалентний, а відповідно, і медіанний діаметри. Також це може бути пов'язане з виносом частинок більшого еквівалентного діаметра, які не встигли осісти у відстійнику та недостатнім часом перебування стічних вод у відстійниках.



Встановлення залежності між медіанним діаметром та концентрацією завислих речовин дозволить спростити визначення одного з цих параметрів, однак для забезпечення високої достовірності таких математичних моделей необхідно збільшити діапазон вибірки.

1. Kuśnierz M., Wiercik P. Analysis of particle size and fractal dimensions of suspensions contained in raw sewage, treated sewage and activated sludge. *Archives of Environmental Protection*. 2016. Vol. 42, no. 3. Pp. 67–76. 2. Cornacchia M., Moser G., Saturno E., Trucco A., Costamagna P. Analysis of particle size distribution in municipal wastewaters. *Environmental Technology & Innovation*. 2022. Vol. 27. Pp. 1–12. 3. Levine A. D., Tchobanoglous G., and Asano T. Size distribution of particulate contaminants in wastewater and their impact on treatability. *Wat. Res.* 1991. Vol. 25. Pp. 911–922. 4. Assessment Protocol of the applicability of ore-processing technology to treat contaminated soils, sediments and sludges. Document prepared for: Eco-Technology Innovation Section Technology Development and Demonstration Program Environmental Protection Environment Canada (Québec Region) / Anne Gosselin, P.Eng., M. Sc., INRS-Géoresources, Denis Blackburn, P.Eng., M. Sc., Centre de recherche minérale, Mario Bergeron, Ph. D., INRS-Géoresources, Sainte-Foy. March, 1999. 128 p. 5. EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE GENERAL – JRC JOINT RESEARCH CENTRE. Institute for Health and Consumer Protection. Unit: Toxicology and Chemical Substances European Chemicals Bureau. *Guidance Document on the Determination of Particle Size Distribution, Fibre Length and Diameter Distribution of Chemical Substances*. 2002. P. 1–19. 6. Wedd M. W. Determination of PSD Using Laser Diffraction. *Educ. Reso. for Part. Techn. Licensed to ERPT*. 2003. P. 1–4. 7. Ковальчук В. А. Дослідження дисперсного складу забруднень стічних вод м'ясопереробних підприємств. *Вісник НУВГП. Технічні науки*. 2008. Вип. 2(42). С. 290–297.

REFERENCES:

1. Kuśnierz M., Wiercik P. Analysis of particle size and fractal dimensions of suspensions contained in raw sewage, treated sewage and activated sludge. *Archives of Environmental Protection*. 2016. Vol. 42, no. 3. Pp. 67–76. 2. Cornacchia M., Moser G., Saturno E., Trucco A., Costamagna P. Analysis of particle size distribution in municipal wastewaters. *Environmental Technology & Innovation*. 2022. Vol. 27. Pp. 1–12. 3. Levine A. D., Tchobanoglous G., and Asano T. Size distribution of particulate contaminants in wastewater and their impact on treatability. *Wat. Res.* 1991. Vol. 25. Pp. 911–922. 4. Assessment Protocol of the applicability of ore-processing technology to treat contaminated soils, sediments and sludges. Document prepared for: Eco-Technology Innovation Section Technology Development and Demonstration Program Environmental Protection Environment Canada (Québec Region) / Anne Gosselin, P.Eng., M. Sc., INRS-Géoresources, Denis Blackburn, P.Eng., M. Sc., Centre de recherche minérale, Mario Bergeron, Ph. D., INRS-Géoresources, Sainte-Foy. March, 1999. 128 p. 5. EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE GENERAL – JRC JOINT RESEARCH CENTRE. Institute for Health and Consumer Protection. Unit: Toxicology and

Chemical Substances European Chemicals Bureau. *Guidance Document on the Determination of Particle Size Distribution, Fibre Length and Diameter Distribution of Chemical Substances*. 2002. P. 1–19. **6.** Wedd M. W. Determination of PSD Using Laser Diffraction. *Educ. Reso. for Part. Techn. Licensed to ERPT*. 2003. P. 1–4. **7.** Kovalchuk V. A. Doslidzhennia dyspersnoho skladu zabrudnen stichnykh vod miasopererobnykh pidpriemstv. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky*. 2008. Vyp. 2(42). S. 290–297.

Kovalchuk V. A. ^[1; ORCID ID: 0000-0002-4098-7802],

Doctor of Engineering, Professor,

Onysimchuk V. S.,

Master

¹*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne*

DISPERSED COMPOSITION OF INSOLUBLE CONTAMINANTS OF MUNICIPAL WASTEWATER

The properties and characteristics of individual particles play an important role in wastewater treatment processes. The specific surface area, density, shape, size and degree of agglomeration of particles determine the sedimentation properties of the suspension. Today, there are many methods for determining particle sizes: methods of group analysis of particles, methods of individual particle counting and methods of particle size separation. All of them allow us to estimate their size based on one of the properties of the particles, for example, the ability to scatter or block a laser beam, change the electrical resistance of the hole when passing through it, settle under the action of gravity or centrifugal forces, scatter an acoustic signal, etc. Group analysis methods include small-angle laser light scattering methods, correlation photon spectroscopy, backscatter spectroscopy, and others. The following devices are used to count particles: an electric field counter, a light counter, a particle transit time counter, a microscope (optical or electronic). Separation methods include filtration through porous membranes, gravitational sedimentation, disk centrifuges, capillary hydrodynamic fractionation, field sedimentation from the flow, and others. To determine the dispersed composition in this work, it was decided to combine a digital USB microscope with subsequent processing of the obtained images on a computer. This method is quite simple to perform, allows you to determine not only the size of the particles, but also to estimate their shape and has a fairly large measurement range. In this work, the dispersed composition of the suspension of untreated urban wastewater at the entrance to urban treatment plants and at the entrance and exit from primary sedimentation tanks was determined. The relationship between the



concentration of suspended solids and the median diameter of wastewater particles and the logarithm of their standard deviation was studied.

Keywords: urban wastewater; dispersed composition of insoluble impurities; median diameter; equivalent diameter; logarithm of the standard deviation.

Отримано: 07 травня 2025 року
Прорецензовано: 02 червня 2025 року
Прийнято до друку: 16 червня 2025 року