

О.В. ДУПЛЯК, кандидат технічних наук  
С.В. ВЕЛИЧКО, кандидат технічних наук  
Київський національний університет будівництва та архітектури

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ РУСЛА Р. ТИСИ З ВРАХУВАННЯМ ПІДПОРУ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ ПАВОДКУ**

*Наведена послідовність розрахунку підпору в вузлах приєднання притоків до основного русла при проходженні паводкової витрати 1% забезпеченості на прикладі р. Тиси. Методика розрахунку була використана для визначення зон затоплення при проходженні паводку 1% забезпеченості та оцінки ефективності запропонованих активних та пасивних споруд захисту від паводків в басейні р. Тиса.*

**Key words:** паводок 1% забезпеченості, крива підпору, гідравлічний розрахунок, з'єднання потоків.

*Приведена последовательность расчета подпора в узлах присоединения притоков к основному руслу при прохождении паводкового расхода 1% обеспеченности на примере реки Тиса. Методика расчета была использована для определения зоны затопления при прохождении паводка 1% обеспеченности и оценки эффективности предложенных активных и пассивных сооружений для защиты от паводков в бассейне р. Тиса.*

**Key words:** паводок 1% обеспеченности, кривая подпора, гидравлический расчет, соединение потоков.

*The following sequence of curve calculation is proposed in the point of confluence of main river and tributaries during flood of 1% probability on the example of Tisza River. The method of calculation was used to determine flood zones during flood of 1% probability and assessment of effectiveness of the proposed active and passive flood protection structures in the Basin of Tisza River.*

**Key words:** 1% probability flood, backwater curve, hydraulic calculation, confluence of flows.

### **Вступ**

Річка Тиса є найбільшою лівобережною притокою річки Дунай. Її довжина становить 967 км, площа басейну – 157000 км<sup>2</sup>. Протікаючи по території п'яти держав – України, Румунії, Чехії, Угорщини і Сербії, річка Тиса

бере початок на території України на схилах Карпат у вигляді двох окремих річок – Чорної та Білої Тиси. Після їх злиття річка отримує назву р. Тиса.

Площа басейну р. Тиси на території України становить 12760 км<sup>2</sup>, її довжина від витoku (Чорної Тиси) до кордону Україна-Угорщина (гирло р. Батар) налічує 220,4 км.

Паводки в басейні річки Тиса формуються в будь-який час року і можуть бути зливого, снігового або сніго-дощового походження. Характерним є невелика тривалість паводків (3-5 діб). По величині підйому рівні води в річках часто бувають надзвичайними, викликаючи повені, що спричиняють великі збитки для населення, сільськогосподарського виробництва, навколишнього середовища. Для вирішення цієї проблеми було виконане моделювання пропускної здатності русла при проходженні паводків 1% забезпеченості в природних умовах та визначені зони затоплення. На основі аналізу зон затоплення були розроблені протипаводкові заходи пасивного характеру (будівництво дамб, берегоукріплень, залісення схилів, розчищення русл річок) та активні (сухі гірські ємності, польдери). Для випадку повної реалізації протипаводкових заходів були виконані розрахунки рівнів води 1% забезпеченості за допомогою програми MIKE 11. Багаторічні спостереження за витратами та рівнями води в р. Тиса та її притоках показали, що періодично має місце одночасне проходження паводків рідкої повторюваності по притоку та основній річці, в результаті чого утворюється підпор. Значення збільшення рівнів води коливається в межах 0,2...0,5 м, що суттєво впливає на висоту захисних споруд в місцях з'єднання потоків. На сьогоднішній день відсутні нормативні документи або рекомендації по розрахунку та проектуванню гідротехнічних споруд та технічного упорядкування вузлів з'єднання потоків. Тому виникла необхідність розробити інженерну методику розрахунку кривої підпору для практичних цілей.

### **Аналіз існуючих методик розрахунку**

В сучасній літературі є ряд робіт, присвячених дослідженню вузлів з'єднання потоків. Як правило, в цих роботах досліджуються лише окремі явища, що мають місце при злитті потоків.

В усіх роботах, присвячених цьому питанню, відмічається, що відразу за створом бокового притоку поверхня води приймає скривлену форму з значним поперечним похилом до берега, в якому знаходиться устя притоку, а також повздовжнім похилом. Злиття потоків супроводжується втратами енергії місцевого характеру (так звані втрати на злиття), в результаті чого перед місцем з'єднання утворюються деяке підвищення горизонту води порівняно з тим, яке визначається залежністю  $Q = f(h)$  для відповідного створу каналу при рівномірному русі. Роботи, присвячені дослідженню ревеневого режиму у вузлу з'єднання потоків ґрунтуються на застосуванні закону про зміни кількості руху.

З'єднанням потоків займалась велика група вчених: Альферович А., Вейц І., Журін В., Мохов С., Складнев Б., Факторович М., Дупляк В.Д., Матвієнко О., Шліхта В., Бубнов В. та інші.

Загальна гідромеханічна теорія, яка могла б досить достовірно описати механізм з'єднання потоків під різними кутами у великому діапазоні співвідношень витрат, швидкостей, геометричних параметрів, на цей час відсутня.

Розрахунки за різними методиками та порівняння з існуючими даними показали, що найбільш надійно можливо розрахувати підпори при з'єднанні під кутом  $90^\circ$  за рівнянням (1), отриманим Дупляком В.:

$$\frac{\varepsilon^2}{\sigma_1(1+\sigma_1)} + \frac{\sigma_1^2}{6\sigma_n^3}(3+2\sigma_1) = \frac{1}{\sigma_2(1+\sigma_2)} + \frac{\sigma_2^2}{6\sigma_n^3}(3+2\sigma_2) \quad (1)$$

а при співвідношенні витрат бокового та прямого потоків до з'єднання більше 0.3 – з поправкою Шліхти В.:

$$\Delta h = K_L \frac{Q_3}{Q_1} \left( 2 + \frac{Q_3}{Q_1} \right) \frac{V_1^2}{g} \quad (2)$$

де  $\varepsilon = \frac{Q_1}{Q_2}$ ;  $\sigma_1 = \frac{m_1 h_1}{\varrho_1}$ ;  $\sigma_2 = \frac{m_2 h_2}{\varrho_2}$ ;  $\sigma_n = \frac{m h_k}{\varrho}$ ;  $Q_1, Q_2$  – витрата в основному

руслі до з'єднання та після з'єднання потоків;  $Q_3$  – витрата в боковому руслі;  $m_1 = m_2 = m$  – укоси основного русла відповідно до та після з'єднання;  $h_1; h_2; h_3$  – глибина води, відповідно, в прямому руслі до з'єднання потоків та після з'єднання та в боковому руслі;  $\varrho_1 = \varrho_2 = \varrho$  – ширина основного русла;  $K_L = 1,2$  – експериментальний коефіцієнт, який враховує додаткові втрати енергії на границі розділу транзитного потоку в коловоротній області;  $V_1$  –

швидкість руху в основному руслі до з'єднання;  $h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q_2^2}{g \varrho^2}}$  – критична

глибина умовного прямокутного русла, яке має ширину, що дорівнює ширині трапецеїдального прямого русла за вузлом з'єднання.

### Методика розрахунку підпору

З'єднання потоків під кутом  $\varphi$  бокового русла до прямого відбувається за схемою, представленою на рис.1 за наступних припущень:

- відсутності перепони в прямому руслі;
- форма русла приведена до трапецеїдальної;
- однаковий переріз русла до з'єднання та після ( $\varrho = Const$  і  $m = Const$ );
- похил основного русла близький до нуля.

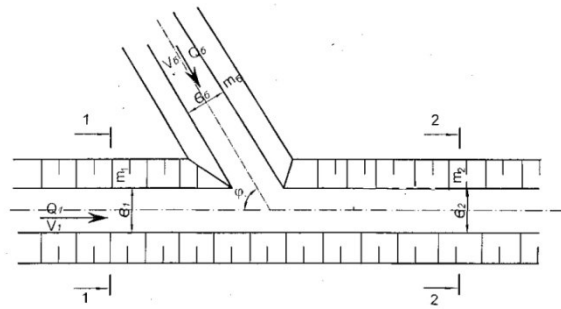


Рис.1. Схема з'єднання потоків

В загальному вигляді для кутів з'єднання  $90^0$  та близьких до них додатковий підпор описується рівнянням:

$$\frac{\varepsilon^2}{\sigma_1(1+\sigma_1)} + \frac{\sigma_1^2}{6\sigma_n^3}(3+2\sigma_1) = \frac{1}{\sigma_2(1+\sigma_2)} + \frac{\sigma_2^2}{6\sigma_n^3}(3+2\sigma_2) + \left| \frac{\sigma_3^2}{6\sigma_n^3}(3+2\sigma_3)\cos\varphi \right| \quad (3)$$

Якщо  $\varphi = 90^0$ , то рівняння спрощується:

$$\theta = \frac{\varepsilon^2}{\sigma(1+\sigma)} + \frac{\sigma^2}{6\sigma_n^3}(3+2\sigma), \quad (4)$$

де  $\varphi$  – кут з'єднання потоків;  $\theta$  – константа, визначається за графіками.

В загальному випадку рішення рівняння (3) можливо отримати методом підбору (поступового наближення).

Глибина потоку перед з'єднанням буде:

$$h_1 = \frac{\sigma_1 \theta_1}{m_1} = h_2 + \frac{\Delta \sigma \theta_2}{m_2} \quad (5)$$

Результати розрахунків по залежності (3) та (4) при  $Q_3/Q_1 > 0,3$  можуть давати дещо занижені значення підпору перед вузлом з'єднання потоків. В такому випадку рекомендується проводити перевірку за залежністю:

$$h_1 = h_2 + 2,24 \frac{Q_3}{Q_1} \left( 2 + \frac{Q_3}{Q_1} \right) \cdot \frac{Q_1^2}{2g \cdot \omega_2^2} \quad (6)$$

### Апробація методики

Побудові розрахункових схем вузлів з'єднання потоків різної забезпеченості передувало детальне обстеження в натурі гирлових ділянок річок, фотографування, їх ідентифікація на картах, побудова на основі існуючих топографічних матеріалів поперечних перерізів русел в розрахункових створах.

Для розрахунків приймалась однакова забезпеченість витрати води як основної річки так і її приток. Максимальні рівні води при проходженні паводків 1% забезпеченості визначались при моделюванні на програмному забезпеченні MIKE 11 за даними значень витрат та рівнів води на гідрологічних постах. Якщо гідрологічні пости на притоці були відсутні, то значеннями витрат розраховувались за створами аналогами. Результати

розрахунків порівнювались з замірними на гідропостах та відновленими рівнями води по міткам високих вод. Основними притоками р. Тиса є Косівська (Кісва), Шопурка, Тересва, Ріка, Теробля, Боржава, Апишця, Іза, Вишеу, Сепниця (з території Румунії). Лінійна схема р. Дністер представлена на рис. 2. Для кожного вузла з'єднання розраховувалась витрата основної річки до з'єднання та після та витрата бокової притоки. Параметри перерізу приводились до трапецеїдальної форми.

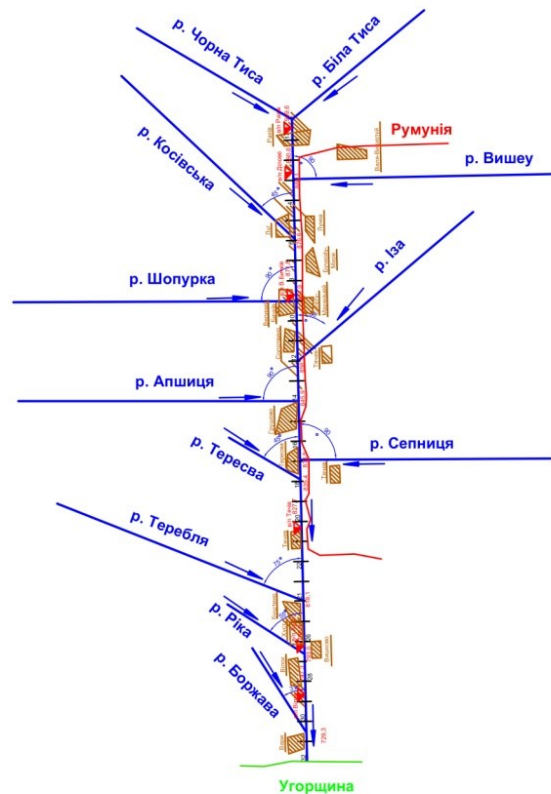


Рис.2. Лінійна схема р. Тиса

### Результати та дискусія

Використовуючи рівняння (3), (4) та (5) були проведені розрахунки підпору у вузлах з'єднання р. Тиса з її притоками за формулою (5) та по уточненій формулі (6). Результати розрахунків на основних притоках представлені в таблиці 1.

Аналіз гідрологічних даних щодо величин паводків рідкої повторюваності в басейні р. Тиса, показує, що бокові притоки які мають значно менші витрати ніж основна річка не утворюють підпори.

Підпори від річок що мають співвідношення до основної річки більше 30% можуть сягати від 0,3 до 1,42 м, що необхідно враховувати при розрахунках.

## Визначення підпорів в вузлах р. Тиса

Бокова притока	$Q_3/Q_1$	Підпор, м (5)*	Підпор, м (6)**
Вишеу	1,0	1,42	1,53
Косівська	0,12	0,33	-
Шопурка	0,2	0,24	-
Іза	0,31	0,47	0,50
Апшиця	0,13	0,63	-
Сепниця	0,07	0,08	-
Тересва	0,41	0,80	0,91
Теребля	0,25	0,72	0,70
Ріка	0,33	0,28	0,33

\*  $h_1-h_2$  розраховане за формулою (5)

\*\*  $h_1-h_2$  розраховане за формулою (6)

## Висновки

Наведена послідовність розрахунку підпору в вузлах з'єднання основної річки з притоком. Дана методика розрахунків достатньо проста, не вимагає спеціального обладнання і може використовуватись для інженерних розрахунків. Апробація даної методики розрахунку показала, що при співвідношенні витрати притоку та основної річки  $Q_3/Q_1 < 0.2$  підпор практично відсутній (значення в межах точності розрахунків). При співвідношенні  $Q_3/Q_1 > 0,3$  та куті з'єднання меншим за  $90^\circ$  розрахунок за формулою (6) та (5) дають практично однакові значення.

## Список літератури

1. Трофимов Г.И. Рациональное начертание границ на участке слияния двух потоков // Труды ЛИИВТ. В.132. Л.:Транспорт. 1972.
2. Козлов Д.А., Будыка С.Х. Определение глубины в зоне слияния безнапорных потоков под углом  $\pi/2$ . // Док. АН БССР, 1976. Т.20, № 7. С.649-652.
3. Дупляк В.Д. Определение глубин воды в трапецеидальном канале в зоне соединения с боковым потоком, поступающим под углом  $\pi/2$ . / в кн. Мелиорация и водное хозяйство. К., 1975. Вып. 33. С. 86-96.
4. Шлихта В.М. Кинематика потока в узле слияния за трубчатыми выпускными сооружениями. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Ровно, 1990. 173 с.
5. Величко С.В., Дупляк О.В. Дослідження впливу трансформації 1% паводкової витрати сухими гірськими ємностями на рівні паводкової витрати річок басейну Тиси // Проблеми водопостачання, водовідведення і гідравліки. К.: КНУБА, 2013. Вип.22. С.173-180.

Стаття надійшла до редакції 23.11.17

С.С. ДУШКИН, доктор технических наук, профессор  
С.С. ДУШКИН, кандидат технических наук  
Харьковский национальный университет городского хозяйства  
имени А.Н. Бекетова

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОНТАКТНЫХ ОСВЕТИТЕЛЕЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

*Рассмотрены вопросы, связанные с использованием контактных осветлителей при подготовке питьевой воды с применением концентрированного раствора сульфата алюминия.*

**Ключевые слова:** контактная коагуляция, контактный осветлитель, раствор сульфата алюминия, качество фильтрата, интенсификация процессов очистки воды.

*Розглянуті питання, пов'язані з використанням контактних освітлювачів при підготовці питної води із застосуванням концентрованого розчину сульфату алюмінію.*

**Ключові слова:** контактна коагуляція, контактний освітлювач, розчин сульфату алюмінію, якість фільтрату, інтенсифікація процесів очищення води.

*The questions related to the use of contact clarifiers in the preparation of drinking water with the use of the concentrated aluminum sulfate solution are considered.*

**Key words:** contact coagulation, contact clarifier, aluminum sulfate solution, filtrate quality, intensification of processes of water treatment.

Метод очистки воды, основанный на использовании явления контактной коагуляции, называется методом контактного осветления. Данный метод в состоянии обеспечить высокий и устойчивый эффект при различных изменяющихся по сезонам года физико-химических условиях коагуляции, с меньшими дозами коагулянта, чем в обычной схеме очистки воды с отстаиванием и фильтрацией [1].

Контактные осветлители представляют собой сооружения для осветления и обесцвечивания воды, совмещающие функции камеры хлопьеобразования, отстойника и скорого фильтра; являются разновидностью скорого фильтра. Работают контактные осветлители по принципу фильтрования в направлении убывающей крупности зерен через слой загрузки большой толщины; действие их основано на принципе контактной коагуляции, которая происходит при фильтровании воды через зернистую загрузку.

Контактные осветлители целесообразно применять в одноступенчатых схемах очистки маломутных цветных и мутно-цветных вод, когда общее содержание взвешенных веществ в поступающей на контактные осветлители воде, включая взвесь, образующуюся в результате введения в воду реагентов, не превышает 150 мг/л. При большем содержании взвеси в воде резко возрастает расход воды на промывку контактных осветлителей [2].

Преимущества метода контактного осветления воды, заключающиеся в принципиальной возможности осветления воды в одном сооружении, уменьшении доз коагулянта, возможности получения высокого эффекта осветления воды без применения каких-либо дополнительных реагентов и, наконец, в возможности осветления больших масс воды при минимальных потерях напора, требуют применения специального сооружения, отвечающего закономерностям контактной коагуляции. Радикальной мерой увеличения грязеемкости загрузки является фильтрование воды в направлении убывающей крупности зерен, этот принцип имеет место в контактном осветлителе.

Рассмотрение опубликованных работ [3, 4, 5] позволяет выделить следующие методы интенсификации процесса осветления воды в контактных осветлителях:

- фильтрование в направлении убывающей крупности зерен загрузки, а также ее укрупнение с одновременным увеличением высоты слоя с целью снижения интенсивности прироста потерь напора за счет рассредоточения загрязнений в возможно большем объеме (наиболее удачно это реализуется в контактных осветлителях);

- применение различных способов предварительной обработки воды с целью увеличения плотности и прочности задерживаемых фильтром загрязнений, более равномерного их распределения в толще фильтрующего слоя;

- применение для загрузки зернистых материалов с высокой межзерновой пористостью и развитой удельной поверхностью.

Условиями эффективной работы контактных осветлителей являются соблюдение установленной скорости фильтрования, выбор оптимальных доз реагентов, а также своевременная и качественная промывка и сохранение загрузки в надлежащем санитарном и техническом состоянии.

Анализ существующих методов повышения эффективности работы контактных осветлителей показывает, что весьма актуальным является разработка новых, более эффективных как по капитальным, так и по эксплуатационным затратам, методов, интенсифицирующих процессы контактной коагуляции, к числу которых относится рассматриваемый в данной работе метод обработки воды концентрированным раствором коагулянта, который позволяет улучшить качество воды, снизить расходы реагентов, уменьшить габариты отдельных сооружений реагентного хозяйства, снизить себестоимость осветленной воды.



Исследования проводились на лабораторной установке, состоящей из двух стеклянных колонн диаметром 100 мм и высотой 1000 мм, заполненных кварцевым песком  $d = 0,5...1,2$  мм,  $d_{\text{экв}} = 0,7...0,8$  мм, высотой 800 мм. Фильтрация осуществляется снизу вверх, скорость фильтрования не превышала 1 м/ч.

Во время проведения опытов фиксировалось качество фильтрата и потеря напора в загрузке. Качество фильтрата оценивалось путем измерения коэффициента ослабления света с помощью фотоэлектроколориметра. Потери напора определялись по данным пьезометров пьезометрического щита.

Качественная характеристика исследуемой воды приведена в табл. 1.

Таблица 1

**Качественная характеристика исследуемой воды**

№ п/п	Наименование показателя	Показатели	
		маломутная цветная вода	мутно-цветная вода
1.	Температура, °С	9,5...10,1	9,5...10,1
2.	Содержание взвешенных веществ, мг/дм <sup>3</sup>	12,5	55
3.	Цветность, град. ПКШ	75	90
4.	рН	7,1...7,3	7,1...7,3
5.	Общая жесткость, моль/дм <sup>3</sup>	3,7...4,1	3,8...4,2
6.	Щелочность, моль/дм <sup>3</sup>	2,4...2,8	2,5...2,7

Концентрация раствора коагулянта не превышала 25%, доза коагулянта сульфата алюминия – 45...70 мг/дм<sup>3</sup>, считая на чистый продукт.

Влияние концентрированного раствора сульфата алюминия на очистку маломутных цветных вод приведена в табл. 2, кривые контактной коагуляции для мутноцветной воды показаны на рис. 1.

Анализ опытных данных показывает, что использование концентрированных растворов коагулянта сульфата алюминия позволяет снизить его дозы в среднем на 20...25% без ухудшения качества очистки воды. Так, при концентрации раствора 10% и дозе его 45 мг/дм<sup>3</sup> содержание взвешенных веществ и цветность осветленной воды составляет соответственно 5,1 мг/дм<sup>3</sup> и 25 град. ПКШ. При обработке воды концентрированным 25% раствором коагулянта содержание взвешенных веществ и цветность осветленной воды находятся на прежнем уровне, при этом снижение дозы коагулянта составляет 28,5%.

Таблица 2

**Влияние концентрации растворов коагулянта сульфата алюминия  
на очистку маломутных цветных вод**

Качественные показатели осветляемой воды			Концентрация раствора коагулянта, %	Доза коагулянта, мг/дм <sup>3</sup>	Показатели осветленной воды		Улучшение показателей осветленной воды, %		Снижение дозы коагулянта, %
t, °C	Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	Цветность, град. ПКШ			Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	Цветность, град. ПКШ	Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	Цветность, град. ПКШ	
9,5...10,1	12,5	75	10	45	5,1	25	—	—	—
9,5...10,1	12,5	75	15	45	4,4	22	15,9	13,6	—
9,5...10,1	12,5	75	20	45	4,0	18	24,5	38,8	—
9,5...10,1	12,5	75	25	45	4,2	20	21,4	25	—
9,5...10,1	12,5	75	20	40	4,8	23	8,5	8,6	12,5
9,5...10,1	12,5	75	25	35	4,9	23	4,1	8,6	28,5

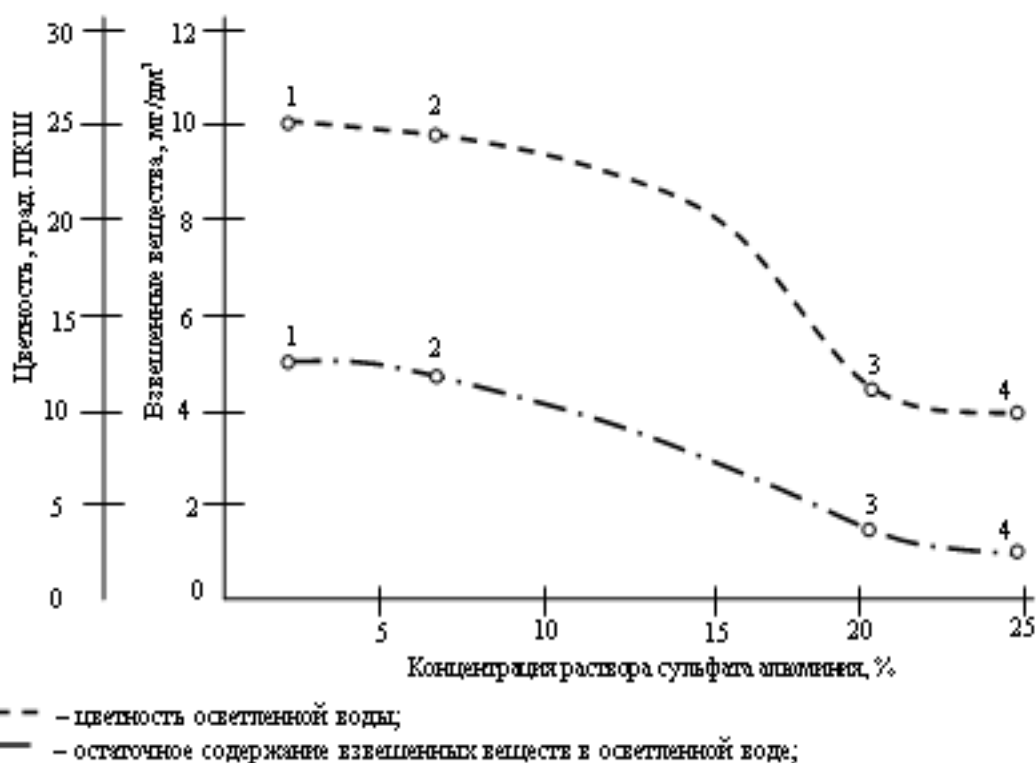


Рис. 1. Кривые контактной коагуляции для мутно-цветной вод

Кривые контактной коагуляции (рис. 1) позволяют сделать вывод, что обработка воды концентрированным раствором коагулянта на I стадии коагуляции не оказывает существенное влияние на качество фильтрата, затем после определенного значения дозы концентрированного раствора

коагулянта качество фильтрата улучшается и уменьшается расход коагулянта без ухудшения качества фильтрата. Анализ кривых контактной коагуляции показывает, что зоны контактной коагуляции при использовании концентрированных растворов коагулянта имеют несколько меньшую величину, чем при обработке воды растворами коагулянта более низкой концентрации, что достаточно хорошо согласуется с исследованиями, выполненными Л.А. Кульским и др. [6].

Опытные данные показывают, что использование концентрированного раствора коагулянта сульфата алюминия позволяет снизить дозы его в среднем на 20% без ухудшения качества осветленной воды. Так, при концентрации коагулянта 10%, содержание взвешенных веществ в осветленной воде составляет 5,1 мг/дм<sup>3</sup> и цветность воды – 25 град. ПКШ, а при концентрации коагулянта 20...25%, содержание взвешенных веществ и цветность воды составляет, соответственно, 4 мг/дм<sup>3</sup> и 18 град. ПКШ. При снижении дозы коагулянта до 35% содержание взвешенных веществ в осветляемой воде составляет 4,1 мг/дм<sup>3</sup>, цветность – 23 град. ПКШ, т.е. находится на уровне 100% расхода коагулянта.

#### **Вывод**

Использование концентрированного раствора коагулянта сульфата алюминия позволяет интенсифицировать процессы очистки воды в контактных осветлителях, что находит выражение в повышении качества осветленной воды и снижение расхода коагулянта в среднем на 20...25%.

#### **Список литературы**

1. *Кульский Л.А.* Теоретические основы и технология кондиционирования воды / Л. А. Кульский. К.: Наукова думка, 1983. 528 с.
2. *Минц Д. М.* Теоретические основы технологии очистки воды / Д.М. Минц. М.: Стройиздат, 1964. 155 с.
3. *Душкин С. С.* Повышение эффективности работы фильтров очистных сооружений водопровода / С. С. Душкин, Е. Б. Сорокина, Г. И. Благодарная // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Вып. 65. Х.: ХГПУ, 1999. С. 30-34.
4. *Шуберт С. А.* Опыт применения метода контактного осветления воды и пути его усовершенствования / С. А. Шуберт, З. Я. Городищер, В. П. Криштул и др. // Водоснабжение: науч. труды. М.: ОНТИ, 1968. №53. С. 11-20.
5. *Душкин С. С.* Анализ причин, влияющих на продолжительность фильтроцикла контактных осветлителей / С. С. Душкин, В. О. Тихонюк // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 29. К.: Техника, 2001. С. 7-8.
6. *Кульский Л. А.* Повышение эффективности обработки воды путем применения концентрированных растворов коагулянта / В.Ф. Накорчевская, Л. А. Кульский, В.А. Ромоданова, В.М. Зайцева // Журнал «Водоснабжение и санитарная техника» № 1. 1974. С. 22-25.

*Стаття надійшла до редакції 5.11.17*

С.М. ЭПОЯН, доктор технических наук,  
А.С. КАРАГЯУР, доктор технических наук  
Харьковский национальный университет строительства и архитектуры  
В.Н. ВОЛКОВ  
Коммунальное предприятие «Харьководоканал»

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СКОРОГО ФИЛЬТРА С ОТВОДОМ ЧАСТИ ПОТОКА В НИЖНИЕ СЛОИ И ДООЧИСТКОЙ НА ДРЕНАЖНОЙ СИСТЕМЕ

*Розроблено математичну модель процесу послідовного фільтрування малокоцентрованої суспензії через шар зернистого завантаження і пористу перегородку з волокнистих полімерних матеріалів з відведенням частини потоку в нижні шари. Розглянуто фільтрування з утворенням шару осаду на пористій перегородці. Обґрунтовано основні напрями вдосконалення конструкції швидкого фільтра і дренажної системи.*

**Ключові слова:** зернисте фільтруюче завантаження, завислі речовини, дренажна система, волокнисті полімерні матеріали, математична модель.

*Разработана математическая модель процесса последовательного фильтрования малокоцентрированной суспензии через слой зернистой загрузки и пористую перегородку из волокнистых полимерных материалов с отводом части потока в нижние слои. Рассмотрено фильтрование с образованием слоя осадка на пористой перегородке. Обоснованы основные направления усовершенствования конструкции скорого фильтра и дренажной системы.*

**Ключевые слова:** зернистая фильтрующая загрузка, взвешенные вещества, дренажная система, волокнистые полимерные материалы, математическая модель.

*A mathematical model of the consistent filtration process of a low-concentration suspension through a layer of granular media and a fibrous polymeric porous septum with the bypass of part of the flow to the lower layers is developed. The filtration with the formation of a sediment layer on a porous septum is considered. The main directions of improvement of the rapid filter design and drainage system are justified.*

**Keywords:** granular filtering media, suspended solids, drainage system, fibrous polymeric materials, mathematical model

Скорые фильтры с зернистой загрузкой являются важной составляющей в технологической схеме подготовки питьевой воды из поверхностных источников. При эксплуатации данных сооружений

существенной проблемой является обеспечение как можно полного использования грязеемкости фильтрующей загрузки. Это дает возможность увеличить продолжительность фильтроцикла, и соответственно, уменьшить количество промывной воды, необходимой для регенерации, что, в свою очередь, обеспечивает значительное сокращение эксплуатационных затрат [1, 3]. При однослойной загрузке первый по направлению фильтрации слой зачастую быстро кольматируется, потери напора достигают предельных значений, фильтр необходимо отключать на регенерацию. При этом нижние слои остаются практически «чистыми».

Для более равномерного распределения загрязнений по высоте фильтрующего слоя широко используют двухслойную загрузку с убывающей по направлению фильтрации крупностью зерен [2, 1370; 3, 9; 4, 137]. Во избежание перемешивания слоев при промывке они должны иметь разную плотность. Это условие, плюс требования для каждого слоя к высокой пористости, достаточной извлекающей способности, устойчивости к истиранию, а также увеличение расширения слоя при промывке, ограничивает выбор материалов как естественного, так и искусственного происхождения.

В связи с этим извлечение из воды тонкодисперсной взвеси с помощью полимерных волокнистых пористых материалов имеет ряд преимуществ. При том, что обеспечивается качество очистки не хуже, чем на зернистой загрузке из кварцевого песка или пенополистирола [5, 8], исключается вынос частиц волокнистой загрузки, соответственно, ее перемешивание с зернистым слоем, возможно изготовление оболочек в широком диапазоне размеров пор, в том числе переменной величины.

Для интенсификации работы скорых фильтров предлагается проводить доочистку воды после прохождения зернистого слоя на пористых оболочках дренажных систем [6, 102]. Для уменьшения потерь напора при регенерации возможно применение оболочек с порами, расширяющимися при промывке, или отдельных дренажей, работающих только на прием фильтрата. При наличии доочистки крупность зернистой загрузки можно увеличить, подобрав такие параметры, при которых продолжительность фильтроцикла будет максимальна. Если же характеристики существующих зернистых материалов не соответствуют рациональным величинам, то повысить эффективность фильтрации возможно за счет отвода части потока из надфильтрового пространства в нижние слои. Регулируя высоту расположения переливной перегородки и глубину отвода части потока можно добиться равномерного распределения загрязнений по толщине зернистого слоя, а также обеспечить рациональную нагрузку на пористую волокнистую оболочку.

Целью исследований является усовершенствование математической модели работы скорого фильтра с отводом части потока в нижние слои, где осуществляется последовательная очистка малоконцентрированной суспензии в зернистом слое и на пористой волокнистой перегородке, а также теоретическое обоснование рациональных параметров данного сооружения.

При математическом моделировании процесса последовательной очистки воды на скором фильтре с зернистой и волокнистой загрузкой, а также отводом части потока в нижние слои, приняты следующие допущения и упрощения:

- течение очищаемой жидкости через слой зернистой загрузки и пористую перегородку происходит в ламинарном режиме;
- вклад диффузии в перенос взвешенных веществ при фильтрации в слое зернистой загрузки мал в сравнении с другими составляющими;
- кинетика изменения концентрации взвешенных веществ в зернистой загрузке описывается линейной зависимостью;
- фильтрование через пористую перегородку происходит с образованием слоя несжимаемого осадка, пористая перегородка не коагулируется;
- образование слоя осадка на пористой перегородке происходит равномерно по всей ее площади;
- содержание взвеси в воде, прошедшей через пористую перегородку, зависит от ее рейтинга фильтрации (размеров пор) и не превышает критическое значение для фильтрата;
- подача воды на фильтр не изменяется во времени  $Q_0 = const$ ;
- в начале фильтроцикла остаточная концентрация взвешенных веществ в зернах загрузки и на поверхности пористой перегородки равна нулю.

С учетом принятых допущений основу математической модели работы фильтра с доочисткой на дренажной системе и отводом части потока в нижние слои составляют следующие уравнения и зависимости:

1) уравнение фильтрации

– для потока 1, который фильтруется через верхний слой зернистой загрузки,

$$Q_1(t) = \frac{\rho g}{\mu} \frac{h_w(t) + h_{31} + h_{32}}{\frac{R_{3.3.1}(t)}{F_{3.3.}} + \left(1 + \frac{Q_2(t)}{Q_1(t)}\right) \left(\frac{R_{3.3.2}(t)}{F_{3.3.}} + \frac{R_{oc}(t)}{F_{п.п.}} + \frac{R_{п.п.}}{F_{п.п.}}\right)}; \quad (1)$$

– для потока 2, который отводится в нижний слой зернистой загрузки,

$$Q_2(t) = \frac{\rho g}{\mu} \frac{h_w(t) + h_{31} + h_{32}}{\frac{R_n(t)}{b(h_w(t) - h_n)} + \left(1 + \frac{Q_2(t)}{Q_1(t)}\right) \left(\frac{R_{3.3.2}(t)}{F_{3.3.}} + \frac{R_{oc}(t)}{F_{п.п.}} + \frac{R_{п.п.}}{F_{п.п.}}\right)}; \quad (2)$$

2) зависимость, описывающая изменение толщины слоя воды над слоем фильтрующей загрузки

$$h_w(t) = \frac{Q_0 - (Q_1(t) + Q_2(t))}{F_{3.3.}} t; \quad (3)$$

3) уравнение переноса взвешенных частиц взвеси потоком фильтрующейся жидкости

$$n_3(z,t) \frac{\partial C(z,t)}{\partial t} + V(t) \frac{\partial C(z,t)}{\partial z} + \frac{\partial S(z,t)}{\partial t} = 0; \quad (4)$$

4) уравнение массопередачи частиц взвеси из воды в твердую фазу зернистой загрузки

$$\frac{\partial S(z,t)}{\partial t} = b(t)C(z,t) - a(t)S(z,t); \quad (5)$$

5) зависимости для определения кинетических коэффициентов  $a(t)$  и  $b(t)$

$$a(t) = \frac{V(t)}{d_{3.3.}} \alpha; \quad b(t) = \frac{\beta}{(V(t))^{0.7} d_{3.3.}^{1.7}}; \quad (6)$$

6) зависимость, учитывающая изменение пористости зернистой загрузки в результате кольматации

$$n_{3.3.}(z,t) = n_{03.3.} - \frac{S(z,t)}{\gamma}; \quad (7)$$

7) зависимость, учитывающая изменение удельного сопротивления зернистой загрузки в результате кольматации

$$r_{3.3.}(z,t) = r_{03.3.} \left( \frac{n_{03.3.}}{n_{3.3.}(z,t)} \right)^3; \quad (8)$$

8) зависимости для определения удельного сопротивления незакольматированной загрузки, осадка и пористой перегородки (для пористой перегородки зависимость Козени-Кармана модифицирована, т.к. расчетным параметром является размер не зерна, а поры)

$$r_{03.3.} = k_1 F_{уд.3.3.}^2 \frac{(1-n_{03.3.})^2}{n_{03.3.}^3}, \quad r_{oc} = k_1 F_{уд.ос.}^2 \frac{(1-n_{oc})^2}{n_{oc}^3}, \quad r_{п.п.} = \frac{k_1 F_{уд.п.п.}^2}{n_{п.п.}}; \quad (9)$$

9) зависимость для определения толщины слоя осадка, образующегося на поверхности пористой перегородки

$$h_{oc}(t) = \frac{(Q_1(t) + Q_2(t)) E(d_{oc}) C(h_{3.3.1}, t)}{\rho_{oc} F_{п.п.} n_{03.3.}} t; \quad (10)$$

10) зависимость для расчета концентрации взвешенных веществ в воде в месте соединения потоков  $Q_1$  и  $Q_2$

$$C(h_{3.3.1}, t) = \frac{C_1(h_{3.3.1}, t) Q_1(t) + C_0 Q_2(t)}{Q_1(t) + Q_2(t)}, \quad (11)$$

где  $t$  – время, с;  $Q_1$  – расход воды, который фильтруется через верхний слой, м<sup>3</sup>/с;  $Q_2$  – расход воды, который отводится в нижний слой, м<sup>3</sup>/с;  $Q_0$  – расход воды, который подается на фильтр, м<sup>3</sup>/с;  $F_{3.3.}$  – площадь фильтрации зернистой загрузки, м<sup>2</sup>;  $F_{п.п.}$  – площадь фильтрации пористой перегородки,

м<sup>2</sup>;  $R_n$  – сопротивление переливной перегородки, м<sup>-1</sup>;  $R_{3.3.1}(t) = \int_0^{h_{3.3.1}} r_{3.3.}(z,t) dz$ ,

$R_{3.3.2}(t) = \int_{h_{3.3.1}}^{h_{3.3.2}} r_{3.3.}(z,t) dz$  – сопротивление верхнего и нижнего слоя зернистой

загрузки  $m^{-1}$ ;  $R_{п.п.} = \sum_{i=1}^k h_{п.п.i} r_{п.п.i}$  – сопротивление пористой перегородки  $m^{-1}$ ;

$R_{ос}(t) = h_{ос}(t)r_{ос}$  – сопротивление слоя осадка,  $m^{-1}$ ;  $r_{з.з.}(z, t)$  – удельное сопротивление зернистой загрузки,  $m^{-2}$ ;  $r_{0з.з.}$  – удельное сопротивление незакольтированной зернистой загрузки,  $m^{-2}$ ;  $r_{п.п.i}$  – удельное сопротивление  $i$ -го слоя пористой перегородки,  $m^{-2}$ ;  $r_{ос}$  – удельное сопротивление слоя осадка,  $m^{-2}$ ;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $h_{з.з.1}$  – толщина верхнего слоя зернистой загрузки, м;  $h_{з.з.2}$  – толщина нижнего слоя зернистой загрузки, м;  $h_{ос}(t)$  – толщина слоя осадка на пористой перегородке, м;  $h_{п.п.i}$  – толщина  $i$ -го слоя пористой перегородки, м;  $h_w(t)$  – толщина слоя воды над слоем зернистой загрузки, м;  $h_p$  – высота расположения переливной перегородки над зернистой загрузкой, м;  $b$  – ширина переливной перегородки, м;  $z$  – вертикальная координата, м, которая изменяется в диапазоне от 0 до  $(h_{з.з.1}+h_{з.з.2})$ ;  $C(z, t)$  – концентрация частиц взвеси в фильтрующейся жидкости,  $кг/м^3$ ;  $S(z, t)$  – концентрация частиц взвеси, задержанных на зернах фильтрующей загрузки,  $кг/м^3$ ;  $V(t)$  – скорость фильтрования, м/с, на участке от 0 до  $h_{з.з.1}$   $V(t) = Q_1(t)/F_{з.з.}$ , на участке от  $h_{з.з.1}$  до  $h_{з.з.2}$   $V(t) = (Q_1(t) + Q_2(t))/F_{з.з.}$ ;  $a(t)$  и  $b(t)$  – коэффициенты, соответственно, отрыва и прилипания частиц взвеси к зернам загрузки,  $c^{-1}$ ;  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, учитывающие физико-химические свойства зерен загрузки и фильтрующейся через нее суспензии;  $n_{з.з.}(z, t)$  – пористость зернистой загрузки;  $n_{0з.з.}$  – пористость незакольтированной зернистой загрузки;  $n_{ос}$  – пористость осадка;  $n_{п.п.}$  – пористость пористой перегородки;  $\gamma$  – концентрация твердых частиц взвеси в осадке,  $кг/м^3$ ;  $F_{уд.} = 6\Phi/d$  – удельная поверхность зерен загрузки (частиц осадка, пор пористой перегородки),  $m^{-1}$ ;  $\Phi$  – коэффициент формы, для шарообразных частиц  $\Phi = 1$ ;  $k_1$  – отношение длины пор к размерам поры (коэффициент извилистости);  $d_з$  – эквивалентный диаметр зерен загрузки, м;  $\rho$  – плотность фильтруемой суспензии,  $кг/м^3$ ;  $\rho_{ос}$  – плотность осадка,  $кг/м^3$ ;  $C_1(h_{з.з.1}, t)$  – концентрация взвешенных веществ в потоке  $Q_1$  после фильтрации через верхний слой,  $кг/м^3$ ;  $C(h_{з.з.}, t)$  – концентрация взвешенных веществ в воде на входе в пористую перегородку,  $кг/м^3$ ;  $C_\phi$  – концентрация взвешенных веществ в фильтрате,  $кг/м^3$ ;  $C_0$  – концентрация взвешенных веществ в воде, поступающей на фильтр,  $кг/м^3$ .

Для решения приведенной системы уравнений приняты следующие краевые условия:

– начальные условия: при  $t = 0$   $C(z, 0) = C_\phi$ ;  $S(z, 0) = 0$ ;

в начале фильтроцикла толщина слоя воды над слоем загрузки равна  $h_w(0) = h_w^{\min}$ , где  $h_w^{\min}$  – минимальный уровень воды над зернистой загрузкой, м;

– граничные условия:



при  $z = 0$   $C(0, t) = C_0$ ,  $S(0, t)$  определяется из уравнения (5):

$$S(0, t) = \frac{b(t)}{a(t)} (1 - e^{-a(t)t}).$$

Фильтр отключается на промывку, когда выполняется условие  $h_w(t) \geq h_w^{\max}$ , где  $h_w^{\max}$  – максимальный уровень воды над зернистой загрузкой, м.

Математическая модель, которая состоит из системы уравнений и зависимостей (1)-(11), реализуется численно методом конечных разностей.

В процессе численного моделирования также было изучено влияние следующих параметров:

– приведенная высота расположения переливной перегородки

$$\eta_{\pi} = \frac{h_{\pi} - h_w^{\min}}{h_w^{\max} - h_w^{\min}};$$

– приведенная глубина (от поверхности зернистой загрузки), на которую отводится с надфильтрового пространства часть потока  $Q_2$

$$\eta_{отв} = \frac{h_{31}}{h_{31} + h_{32}};$$

– приведенный эквивалентный диаметр зерен фильтрующей загрузки  $d_{23.3.}/d_{13.3.}$ , где  $d_{23.3.}$ ,  $d_{13.3.}$  – диаметр зерен загрузки в фильтре, соответственно, усовершенствованной и традиционной конструкции, м.

В качестве критерия эффективности принят параметр  $W_2/W_1$ , представляющий собой отношение объема воды, профильтровавшейся до достижения уровня воды над зернистой загрузкой максимального значения в фильтре усовершенствованной конструкции, к такому же параметру в фильтре традиционной конструкции. Для более объективной оценки эквивалентный диаметр зерен загрузки в сооружении традиционной конструкции подобран таким образом, чтобы время достижения максимального уровня воды в надфильтровом пространстве совпадало со временем, когда качество фильтрата снижается ниже критического, т.е. происходит «проскок» загрязнений.

На рис. 1 представлен пример расчета влияния на эффективность работы фильтра параметра  $d_{23.3.}/d_{13.3.}$ . Рассмотрен фильтр с доочисткой и отводом части потока в нижние слои (1), а также без перепуска части расхода (2).

С увеличением размера зерен зернистой загрузки часть загрязнений проходит ее транзитом и задерживается на пористой оболочке дренажной системы, коагуляция зернистой загрузки уменьшается, эффективность работы фильтра возрастает до некоторого значения. С дальнейшим увеличением размера зерен основную нагрузку принимает пористая перегородка, образующаяся слой тонкодисперсного осадка создает значительное сопротивление, эффективность доочистки снижается.

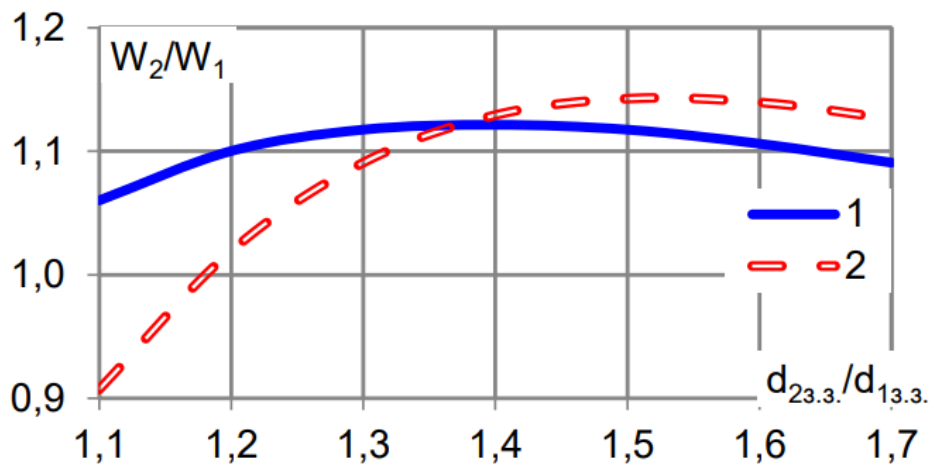


Рис. 1. Влияние размера зерен загрузки на эффективность работы фильтра: **1** – с доочисткой на дренажной системе и отводом части потока в нижние слои; **2** – только с доочисткой на дренажной системе

Следует отметить, что на эффективность доочистки значительно влияют параметры осадка, задерживаемого на оболочке дренажной системы (размер частиц, плотность, пористость, взаимодействие с зернами загрузки в месте расположения дренажной системы и т.д.).

При перепуске части потока, если значение эквивалентного диаметра зерен находится в области, когда более нагруженной является зернистая загрузка, происходит более существенное перераспределение загрязнений на пористую перегородку, эффективность фильтра значительно возрастает. С увеличением диаметра зерен и применением перепуска нагрузка на оболочку дренажной системы возрастает быстрее, чем при отсутствии отвода части потока в нижние слои. Эффективность снижается и становится меньше, чем для фильтра, в котором перепуск части расхода не применяется.

На рис. 2 представлен пример расчета влияния на эффективность работы фильтра параметров  $\eta_n$  и  $d_{23.3}/d_{13.3}$ .

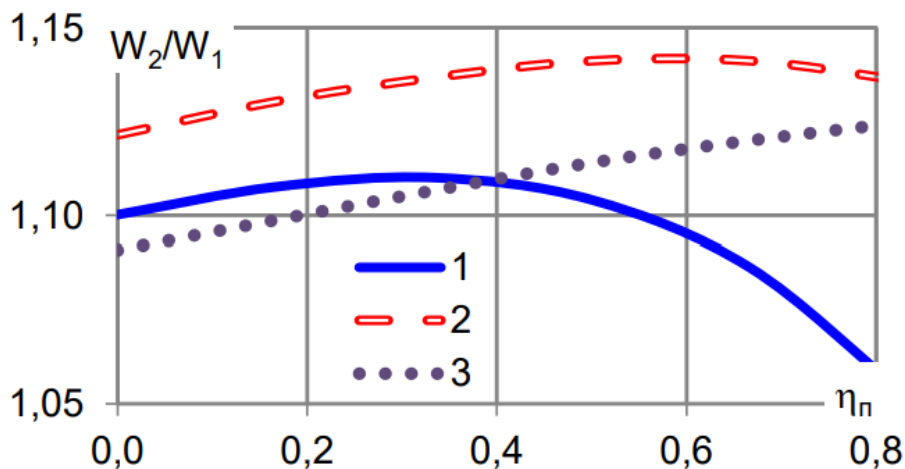


Рис. 2. Влияние высоты расположения переливной перегородки и размера зерен загрузки на эффективность работы фильтра: **1** –  $d_{23.3}/d_{13.3} = 1,2$ ; **2** –  $d_{23.3}/d_{13.3} = 1,4$ ; **3** –  $d_{23.3}/d_{13.3} = 1,7$

- Рассмотрены случаи (рис. 2), когда
- более нагружен зернистый слой (1);
  - зернистый слой и пористая оболочка нагружены приблизительно равномерно (2);
  - более нагружена пористая оболочка (3).

В первом случае перепуск эффективен, когда переливная перегородка расположена на небольшой высоте от минимального уровня воды в надфильтровом пространстве, т.е. отвод воды осуществляется практически сразу с началом процесса фильтрования. Дальнейший подъем переливной перегородки не обеспечивает перераспределение загрязнений на пористую оболочку в достаточной степени, зернистая загрузка остается перегруженной и быстро колюматируется.

Во втором случае высота расположения переливной перегородки практически не влияет на эффективность работы фильтра. Небольшой максимум эффективности реализуется при более высоком расположении переливной перегородки в сравнении с первым случаем.

В третьем случае, как было указано ранее, перепуск только ухудшает эффективность, добавляя нагрузку на перегруженную пористую оболочку. Поэтому максимальное значение эффективности обеспечивается тогда, когда переливная перегородка находится как можно выше и перепуск практически не осуществляется.

Также изучено влияние на эффективность глубины, на которую отводится часть потока, при различном размере зерен загрузки (рис. 3).

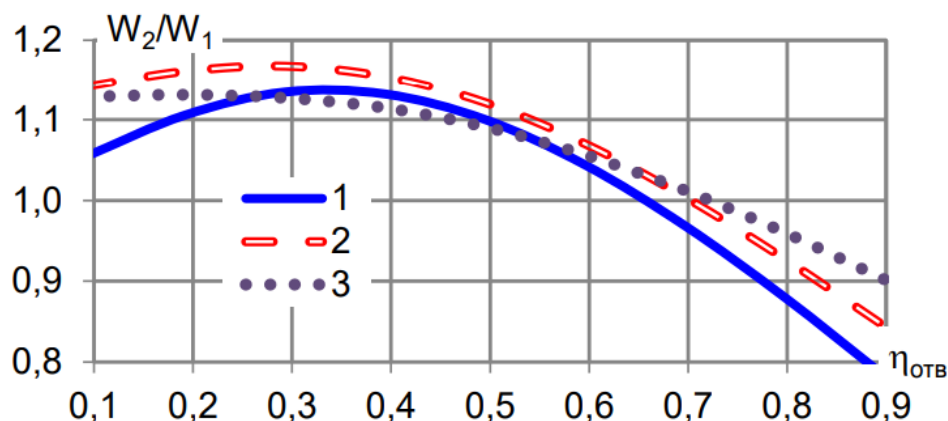


Рис. 2. Влияние параметров  $\eta_{отв}$  и  $d_{23.3}/d_{13.3}$  на эффективность работы фильтра: **1** –  $d_{23.3}/d_{13.3} = 1,2$ ; **2** –  $d_{23.3}/d_{13.3} = 1,4$ ; **3** –  $d_{23.3}/d_{13.3} = 1,7$

Аналогично, с увеличением глубины, на которую отводится часть потока, увеличивается нагрузка на пористую оболочку. При меньших размерах зерен, когда зернистый слой более заколюматирован, максимум эффективности соответствует большей глубине. В этом случае перераспределение на пористую оболочку происходит более интенсивно. С увеличением размеров зерен максимум сдвигается в сторону меньших глубин. При увеличении глубины отвода части потока в толщу загрузки нагрузка на пористую оболочку возрастает, эффективность резко падает.

## **Выводы**

С помощью математического моделирования показана эффективность применения пористой оболочки дренажной системы для доочистки воды, прошедшей слой зернистой загрузки, а также перепуска части потока в нижние слои загрузки для равномерного распределения загрязнений между пористой оболочкой и зернистым слоем.

## **Список литературы**

1. *Грабовский П.А.* Промывка водоочистных фильтров / П.А. Грабовский, Г.М. Ларкина, В.И. Прогульный. Одесса: Оптимум, 2012. 240 с.
2. *Gawade S.* Analysis of PVC rapid sand filter / S. Gawade, Sunil Misal // Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR). 2016. Vol. 2, Issue 9. P. 1370-1373.
3. *Mohanty B.* Design and construction of a modified rapid sand filter for treatment of raw water / B. Mohanty, P. Keval, G. Beran, T. Dhruvit // Journal for Research. 2017. Vol. 3, Issue 3. P. 9-13.
4. *Sanyaolu B.O.* Comparative performance of a charcoal dual media filter and a conventional rapid sand filter / B.O. Sanyaolu // Journal of Natural Sciences Engineering and Technology. 2010. Vol. 9, № 1. P. 137-146.
5. *Бугай Н.Г.*, 2007. Контактная реагентная очистка воды фильтрами из волокнисто-пористого полиэтилена / Н.Г. Бугай, А.И.Кривоног А., В.В. Кривоног // Прикладна гідромеханіка. К., 2007. Т. 9, №1. С. 8–22.
6. *Эпоян С.* Повышение эффективности работы фильтровальных сооружений при применении дренажных систем из пористых полимерных материалов/ С. Эпоян, А. Карагяур, В. Волков, В. Яркин // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow, 2016. Vol. 18, № 6. P. 102-109.

*Стаття надійшла до редакції 12.12.17*

УДК 628.356.5

С.М. ЭПОЯН, доктор технических наук

Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры,

Н.В. СОРОКИНА, кандидат технических наук

Л.А. ФЕСИК, кандидат технических наук

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

## МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЛОВЫХ СМЕСЕЙ ВО ВТОРИЧНЫХ ОТСТОЙНИКАХ

*Розглянуто мікробіологічні, фізико-хімічні та біофізичні гіпотези механізму утворення хлопків активного мулу.*

**Ключові слова:** активний мул, біофлокуляція, мілкодисперсна суспензія, хімічна коагуляція, муловий індекс.

*Рассмотрены микробиологические, физико-химические и биофизические гипотезы механизма образования хлопьев активного ила.*

**Ключевые слова:** активный ил, биофлокуляция, мелкодисперсная взвесь, химическая коагуляция, иловый индекс.

*Microbiological, physical-chemical and biophysical hypotheses on the mechanism of formation of active silt flakes are considered.*

**Key words:** activated sludge, bio flocculation, fine suspension, chemical coagulation, sludge index.

Во взвеси, содержащейся в иловой смеси, которая выходит из аэротенков во вторичные отстойники, помимо активного ила имеются в наличии мелкодисперсные включения, представленные свободноплавающими бактериями, органической и минеральной примесью нерастворимых частиц различной природы [2,21].

Поскольку мелкодисперсная взвесь имеет диаметр частиц 0,2-2 мкм, что на один-два порядка меньше эквивалентного диаметра хлопьев активного ила, скорости их осаждения отличаются в сотни раз и удаление мелкодисперсной взвеси происходит вследствие адгезии хлопком активного ила, а не путем свободного осаждения. Таким образом, эффективность осветления определяется структурой хлопка, его реологическими и адгезионными свойствами и, в меньшей степени, количеством мелкодисперсной взвеси.

По микробиологическому направлению образование хлопьев активного ила и их дезинтеграцию рассматривают как результат видовых изменений в

ценозе, приписывая флокулирующие свойства отдельным видам бактерий (например, *Zooglea ramigera*), простейшим, обуславливающим утилизацию дезинтегрированных частиц хлопка и клеток, нитчатым бактериям, создающим пространственную решетку, и т.п.

Однако в последние годы получено значительное число данных, показывающих, что способностью к биофлокуляции при определенных условиях культивирования обладает большинство групп микроорганизмов.

Последователи физико-химической концепции биофлокуляции рассматривают механизм формирования хлопка активного ила как аналог химической коагуляции. Многочисленными исследованиями показана способность большинства бактерий к коагуляции аналогично гидрофобным коллоидам при величине поверхностного заряда ниже 15 МВ.

Это дает основание рассматривать бактерии как биокolloиды. Наряду с этим установлено также, что выделяемый клетками биополимер обладает свойствами полиэлектролита. На этой основе сделано предположение, что биофлокуляция является результатом взаимодействия высокомолекулярного полиэлектролита с биокolloидными частицами, в качестве которых выступают бактерии. Взаимосвязь между физико-химическими и микробиологическими факторами, определяющими эффективность флокуляции, может быть выявлена на основе более общего биофизического анализа явления.

Связь эффективности флокуляции со степенью обеспеченности (величиной нагрузки на активный ил) отмечалась многими исследователями. Показано, например, что добавление свежего субстрата к флокулированным бактериям вызывает диспергирование хлопьев, к тому же результату приводит отсутствие питания. Это обычное явление с активным илом городских сточных вод (ночью мало стоков, мало питания; днем много стоков, много питания).

Таким образом, можно выделить три состояния биологических систем с точки зрения их склонности к флокуляции. В первом случае при избыточном количестве углеродного питания, что соответствует большому количеству свободной энергии и высокой подвижности клеток, интенсивность образования биополимерного полиэлектролита не достаточна для обеспечения флокуляции. Во втором противоположно предельном случае при остром лимитировании по субстрату равновесие в биоценозе сдвигается в сторону культур, способных метаболизировать биополимер, что приводит к редиспергации хлопьев. Устойчивое стационарное существование хлопьев активного ила реализуются в определенном диапазоне обеспеченности питанием, состоянии хорошо флокулирующего активного ила.

Механизм перехода от свободноплавающих клеток к системе с активным илом может быть представлен следующим образом. В условиях ограниченного углеродного питания клетки снижают количество продуцируемой свободной энергии, при этом двигательная активность

цитоплазмы снижается, что приводит к уменьшению электрокинетического потенциала и, как следствие, к слипанию клеток при их столкновениях в результате броуновского движения и перемешивания. В итоге по данным Поликара, наблюдается явление контактного торможения приостанавливающее не только броуновское движение, но и движение цитоплазмы. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему снижению поверхностного заряда. В результате этих явлений поток субстрата к адгезированным клеткам уменьшается, поскольку увеличивается диффузионное сопротивление и снижается скорость обновления поверхности. Изменение условий внешней среды вызывает падение скорости метаболических реакций и увеличение возраста культуры, приводящее к интенсификации выделения биополимера. В итоге несколько адгезированных клеток покрывается единым биополимерным слоем, формирующим клон [2,53].

Дальнейшей фазой развития процесса флокуляции является образование хлопка активного ила, сформированного из нескольких клонов.

Таким образом, стационарное распределение хлопьев активного ила по размерам устанавливается как результат двух одновременно протекающих и взаимно уравнивающих процессов – диспергирования хлопков под действием турбулентности и их слияние в результате действия сил, обуславливающих флокуляцию.

Рассмотренный характер зависимости условий хлопьеобразования от степени обеспеченности микрофлоры субстратом при отсутствии лимитирования кислородом позволяет объяснить также причины развития нитчатых бактерий в активном иле. Нитчатые бактерии могут появляться в активном иле как при наличии достаточно большого количества кислорода, так и при его нехватке. Это кажущееся противоречие легко устраняется, если учесть, что особенностью бактерий этого вида является повышенная, по сравнению с другими видами, удельная поверхность, обеспечивающая их преимущественное развитие в условиях недостатка в первом случае кислорода. А во втором случае – субстрата.

Способность ила к разделению обычно оценивают с помощью илового индекса  $J_i$ , см<sup>3</sup>/г [1,103; 3,291]. Многочисленными исследованиями показано, что иловый индекс не может служить полноценным показателем процесса осаждения и уплотнения ила. Значение илового индекса существенно зависит от размеров сосуда, в котором производится осаждение ила, и множества других факторов – высоты сосуда, концентрации ила, условий осаждения (консолидирование либо автономное осаждение), интенсивности перемешивания.

Седиментационные свойства иловых смесей оцениваются по кривой Кинша (кривая кинетики снижения границы раздела фаз) [3,381].

На величину илового индекса активного ила влияет суточная нагрузка по величине БПКполн на грамм сухого беззольного вещества ила [3,360]. С

ростом нагрузки от минимальной, характерной для ила продленной аэрации, 100 мг БПК/(г×сут), иловый индекс вначале уменьшается до нагрузки 300 мг БПК/(г×сут), а затем увеличивается при нагрузке 600 мг БПК/(г×сут). К сожалению, в таблицу 10.14 [3,360] не попали значения илового индекса при больших значениях нагрузок. А между тем, при нагрузке 1000 мг БПК/(г×сут) для ила городских сточных вод [3,292] имеется еще один экстремум с величиной илового индекса 80...85 см<sup>3</sup>/г, т.е. аналогичный нагрузкам 300...400 мг БПК/(г×сут). Такой высоконагруженный ил совершенно лишен простейших и мелких животных и имеет высокие седиментационные свойства исключительно вследствие специфики свойств бактериальных микроорганизмов, определяющих и электрические свойства частиц активного ила, и добавляющих к гравитационным характеристикам взвешенных веществ сточных вод новые граничные свойства.

### **Выводы**

Для обеспечения хороших седиментационных свойств активного ила прежде всего необходимо:

- создание оптимальной нагрузки, составляющей для аэротенков на полную очистку 250...350 мг БПК/(г×сут);
- обеспечение кислородом на уровне, исключающем протекание анаэробных процессов;
- поддержание стационарного состояния условий перемешивания иловой смеси при аэрации с исключением условий нарушающих адаптацию.

### **Список литературы**

1. ДБН. В.2.5-75:2013 Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. К., 2013.
2. Евилевич М.А., Брагинский Л.Н. Оптимизация биохимической очистки сточных вод. Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение. 1979. 160 с.
3. Ковальчук В.А. Очистка стічних вод: Навчальний посібник. Рівне: Рівненська друкарня, 2003. 622 с.

*Стаття надійшла до редакції 13.11.17*



С.М. ЭПОЯН, доктор технических наук  
Г.И. СУХОРУКОВ, кандидат технических наук  
Харьковский национальный университет строительства и архитектуры  
В.А. ЯРКИН  
Коммунальное предприятие «Харьковводоканал»

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАБОТЫ ПЕРЕГОРОДЧАТОГО СМЕСИТЕЛЯ КОРИДОРНОГО ТИПА

*Показано важливість інтенсифікації процесу коагуляції води при її очищенні. Наведено результати досліджень перегородчастого змішувача коридорного типу удосконаленої конструкції. Улаштування щілинних поперечних перегородок у коридорах змішувача підвищує ефективність змішування реагентів з водою. На основі регресійного аналізу отримано рівняння регресії, що дозволяє описати процес змішування реагентів з водою та визначити місце вводу другого реагенту.*

**Ключові слова:** перегородчастий змішувач, щілинні перегородки, ефективність змішування, рівняння регресії, другий реагент.

*Показана важность интенсификации процесса коагуляции воды при ее очистке. Приведены результаты исследования перегородчатого смесителя коридорного типа усовершенствованной конструкции. Устройство щелевых поперечных перегородок в коридорах смесителя повышает эффективности смешивания реагентов с водой. На основе регрессионного анализа получено уравнение регрессии, которое позволяет описать процесс смешивания реагента с водой и определить место ввода второго реагента.*

**Ключевые слова:** перегородчатый смеситель, щелевые перегородки, эффективность смешивания, уравнение регрессии, второй реагент.

*The importance of intensifying the coagulation process during water clarification is shown. The results of the study of a partition mixer of the corridor type of the improved design are given. The device of slit lateral partitions in the corridors of the mixer increases the efficiency of mixing the reagents with water. On the basis of regression analysis, a regression equation is obtained, which allows us to describe the process of mixing the reagent with water and determine the location of the second reagent.*

**Keywords:** partition mixer, slotted partitions, mixing efficiency, regression equation, second reagent.

**Введение.** Весь комплекс очистных сооружений водоснабжения состоит из ряда сооружений, которые подготавливают и очищают воду.

Технологические схемы подготовки и очистки воды могут быть самые разнообразные и зависят от физико-химических показателей исходной воды и требований потребителя к ее качеству [1,237; 2,8; 3,34; 4,235; 5,8].

Наиболее распространенным методом очистки воды от взвешенных и коллоидных загрязнений является метод обработки воды коагулянтom, который требует поиска путей для его усовершенствования, а именно увеличение скорости формирования и выпадения коагулированных взвесей в осадок [3,178; 6,80; 7, 302].

Интенсификация процесса коагуляции имеет большое значение в связи с возрастающими требованиями к качеству питьевой воды [8,37; 9,6; 10,15].

Таким образом, повышение эффективности смешения исходной воды с реагентом на водопроводных очистных сооружениях является актуальной задачей.

**Постановка проблемы.** Интенсификация процесса коагуляции заключается в выборе необходимой скорости формирования хлопьев и степени отделения взвеси в объеме обрабатываемой воды, что в конечном итоге играет решающую роль для повышения эффективности осветления воды [11,29; 12,90; 13,81; 14,338].

Процесс смешения раствора коагулянта с водой определяет последующие стадии образования хлопьев гидролизованных форм коагулянта, отстаивания и фильтрование. Гидродинамический режим смешения раствора коагулянта с сырой водой определяет кинетику образования хлопьев, их размер и плотность [15,262; 16, 197; 17,75; 18, 68].

Смешение исходной воды с реагентами осуществляется, как правило, в специальных сооружениях-смесителях. Смесители могут быть гидравлическими и механическими, в зависимости от условий смешивания потока воды с реагентом. Смесители гидравлического типа характеризуются конструктивной простотой и эксплуатационной надежностью, и нашли широкое распространение в нашей стране.

Однако, они не всегда обеспечивают оптимального протекания процессов коагуляции. Недостатками этих конструкций также является невозможность регулирования интенсивности смешения воды, потому что перегородки или устройства для смешивания устроены стационарно. Кроме того, смесители практически используются для смешивания только одного реагента с водой. Поэтому актуальным является усовершенствование конструктивных особенностей гидравлических смесителей для повышения эффективности их работы.

К смесителям гидравлического типа относятся и перегородчатые смесители коридорного типа с горизонтальным движением воды с поворотами на 180°, число поворотов 8-10, которые эксплуатируются на водоочистных комплексах. Однако, смешения реагента с водой в них также протекает при одних и тех же условиях и одинаковых параметрах работы в летний и зимний периоды, а также в периоды паводков. При этом снижается эффективность реагентной обработки и повышается расход коагулянта.

**Целью** данных исследований является интенсификация работы перегородчатого смесителя коридорного типа.

**Основной материал.** В процессе исследований была поставлена задача, подавать различные реагенты в разные места смесителя и регулировать интенсивность смешивания очищаемой воды с реагентом [19,205].

Для интенсификации работы перегородчатого смесителя коридорного типа было предложено установить щелевые поперечные съемные перегородки в коридорах смесителя, а раствор реагентов подавать через лучевые распределители [20,1].

Исследования работы смесителя лучше проводить в лабораторных условиях на моделях, так как на станциях очистки воды должно находиться не меньше двух смесителей, а резервных смесителей не предусматривается, что очень затрудняет условия исследований и эксплуатации.

Моделирование физических явлений представляет собой эффективный метод экспериментальных исследований. Этот метод позволяет на уменьшенной или увеличенной модели изучаемого процесса проводить качественные и количественные наблюдения физических закономерностей, имеющих в натуре, которая часто бывает недоступна для исследований. При этом изучение явлений на модели можно осуществить значительно проще и полнее, чем в натуре. Однако, результаты опытов, проведенных на моделях, могут быть применимы для условий природы, если при проведении опытов будут соблюдены определенные законы моделирования.

Задача физического моделирования - воспроизведение в уменьшенном масштабе изучаемого явления. Естественно, что такое воспроизведение должно обеспечить полное подобие натурального и модельного явления; это означает, что на модели должны наблюдаться процессы той же физической природы, что и в натуре; когда речь идет о движении жидкости, то должно быть обеспечено полное механическое подобие явления; только в этом случае результаты, наблюдаемые на модели, могут быть перенесены на природу.

При моделировании желательно учесть действия сил тяжести и трения [21,18; 22,19;], то есть необходимо одновременно получить равенство числа Рейнольдса и Фруда для модели и природы.

При моделировании по критерию Фруда, скорость движения потока воды в модели горизонтального отстойника необходимо уменьшить в величину корня квадратного с коэффициента масштаба геометрического подобия, а при моделировании по критерию Рейнольдса ее необходимо увеличить в величину коэффициента масштабного геометрического подобия, что одновременно сделать невозможно. Поэтому при моделировании исследуется действие одной силы, которая является главной в явлении, что изучается.

Для геометрически подобных модели и природы, согласно А.А. Сурина [23,38] рассматривают явления движения взвеси в условиях равенства скоростей ( $V_m = V_n$ ), исходя из следующих положений:

- при тождестве входных условий и равенстве скоростей закон падения их в струе будет один и тот же для модели и природы;
- при сохранении геометрического подобия модели и природы и равенства скоростей в них моделировать взвесь не требуется вследствие одинаковых условий ее осаждения (равенство охватываемых скоростей);
- при геометрическом подобии природы и модели равенство скоростей обеспечивает сохранение основных факторов образования и осаждения хлопьев коагулянта.

Моделирование по принципу равенства скоростей позволяет удовлетворять многим критериям подобия  $R_e$ ,  $F_r$  и другим.

Таким образом, в случае со смесителем, в том числе и с перегородчатым смесителем коридорного типа необходимо придерживаться моделирования по критерию равенства скоростей при геометрическом подобии модели и природы, а также при сохранении режима движения воды в них.

Экспериментальные исследования проводились на модели перегородчатого смесителя коридорного типа с горизонтальным движением воды с поворотом на  $180^\circ$ , число поворотов 9 при равенстве скоростей движения потока воды в природе и в модели. В качестве замутнителя служил коагулянт – сернокислый алюминий. Коэффициент эффективности смешения ( $K_c$ ) определяется как отношение минимальной мутности воды ( $M_{min}$ ) к максимальной ( $M_{max}$ ) в каждом канале смесителя. Пробы отбирались в одном и том же месте канала смесителя, но на разных высотах потока.

В исследованиях были приняты щелевые перегородки при скорости движения воды в щелях 0,9...1,1 м/с, а в коридорах от 0,7 до 0,5 м/с. Щелевые перегородки устанавливались в разных коридорах. Температура воды изменялась от 7 до  $17^\circ\text{C}$ . Раствор коагулянта подавался перед щелевыми перегородками по ходу движения потока воды через специальные распределители реагента лучевого типа, которые устанавливались вертикально, а лучи распределителя располагались перпендикулярно щелям щелевых перегородок. Опыты проводились при одинаковых условиях работы смесителя как с щелевыми перегородками, так и без них, что давало возможность сравнивать коэффициенты эффективности смешения ( $K_c$ ). Мутность воды определялась с помощью фотоэлектрокалориметра UV 1600 и весовым способом.

На рис.1 приведена схема экспериментальной установки.

В данную схему входят: перегородчатый смеситель коридорного типа 1; сосуда Мариота 2 на шлангах которых установлены вентили для регулирования расходов реагентов 4, приемные воронки 5, после которых реагенты поступают в лучевые распределители перед щелевыми перегородками (или без них); водопроводная вода по трубопроводу 6

поступает в бак 7 откуда насосом 8 подается в перегородчатый смеситель коридорного типа 1 и далее по трубопроводу 9 в сборный резервуар 10 откуда погружным насосом 11 по трубопроводу 12 сбрасывается в канализацию; перегородчатый смеситель 1 снабжен пробоотборниками 13; смеситель оборудован запорно-регулирующей арматурой 14 и счетчиком воды 15.

Эксперименты показали, что коэффициент эффективности смешения достигает своего максимального значения ( $K_c = 1$ ) значительно раньше в смесителях с щелевыми перегородками.

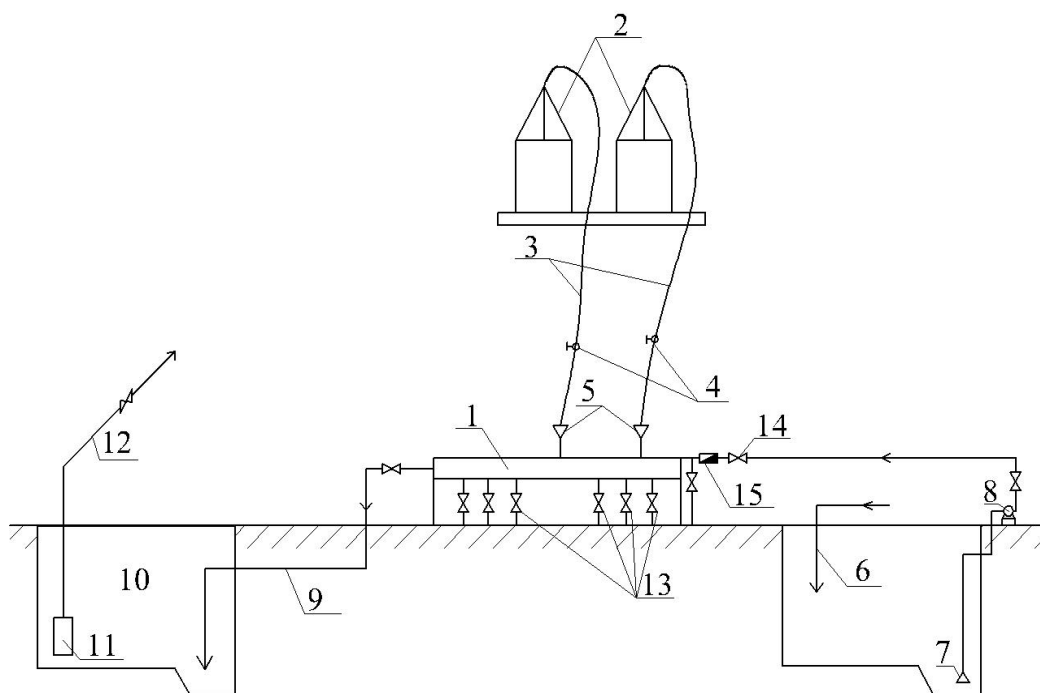


Рис.1. Схема экспериментальной установки

Используя регрессионный анализ [24,408] определяем модель процесса смешения реагента с водой в перегородчатом смесителе коридорного типа усовершенствованной конструкции.

Выбираем функцию, которая аппроксимирует зависимость изменения коэффициента смешения по длине смесителя в виде:

$$K_c = K(V, T, L),$$

где  $K_c$  – коэффициент эффективности смешения;  $V$  – скорость движения воды в щелях перегородки, м/с,  $T$  – температура воды, °С;  $L$  – координата точки в которой определяется коэффициент эффективности смешения, м.

Одной из наиболее распространенных моделей регрессии является многочлен  $m$ -й степени ( $1 \leq m < n$ ). Принимаем 2-ю степень. Тогда модель регрессии имеет вид:

$$y = B_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 + b_6x_3^2,$$

где  $b_i$  – параметры регрессии;  $x_1 - V$ ;  $x_2 - T$ ;  $x_3 - L$ .

Оценка адекватности выбранной модели регрессии производилась в соответствии с правилами регрессионного анализа.

При проведении регрессионного анализа, на основании обработки 27 экспериментальных точек были получены результаты расчетов. Близкий к единице коэффициент множественной корреляции  $R = 0,9923$  и детерминации  $R$ -квадрата  $= 0,9847$ , большое расчетное значение  $F = 215,173$ , статистика Фишера и очень малое значение значимости  $F = 4,38E-17$ , свидетельствуют о высокой адекватности модели регрессии. Искомую зависимость можно выразить полиномом:

$$K_c = 0,6907 - 0,1018 \cdot V - 0,0016 \cdot T + 0,0339 \cdot L + 0,2325 \cdot V^2 + 0,0002 \cdot T^2 - 0,0018 \cdot L^2$$

Таким образом, в результате проведенных исследований получена модель процесса смешения реагентов с водой в перегородчатом смесителе коридорного типа усовершенствованной конструкции, которая позволяет определить место полного смешения реагента с водой, то есть место установки второй щелевой перегородки для интенсификации смешения второго реагента с водой.

### **Выводы**

1. Существующий метод очистки природных вод коагулированием требует усовершенствования. Интенсификация процесса коагуляции позволит улучшить качество очистки воды.

2. Установка щелевых перегородок в коридорах перегородчатого смесителя коридорного типа повышает эффективность смешения реагентов с водой.

3. Получено уравнение регрессии процесса смешения реагентов с водой в перегородчатом смесителе коридорного типа усовершенствованной конструкции.

4. Полученная модель процесса смешения реагентов с водой в перегородчатом смесителе коридорного типа дает возможность определить место ввода второго реагента перед второй щелевой перегородкой.

### **Список литературы**

1. *Абрамов Н.Н.* Водоснабжение: Учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1982. 440 с.

2. *Эпоян С.М., Колотило В.Д., Друшляк О.Г., та ін.* Водопостачання та очистка природних вод: Навчальний посібник. Харків: Фактор, 2010. 192 с.

3. *Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М.* Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3 т. Т.2. Очистка и кондиционирование природных вод: Учебное пособие. М.: Издат. АСВ, 2010. 532 с.

4. *Найманов А.Я., Никиша С.П., Насонкина Н.Г. и др.* Водоснабжение. Донецк: ООО «Норд Компьютер», 2006. 654 с.

5. *Повышение эффективности* работы сооружений при очистке питьевой воды: монография / С. М. Эпоян, Г. И. Благодарная, С.С. Душкин, В.А. Сташук; Харьк. нац. акад. гор. хоз-ва. Х. :ХНАГХ, 2013. 190 с.

6. *Мякишев В.А.* Модернизация коммунальных систем водоснабжения и водоотведения. Симферополь: НАПКС, 2005. 200 с.

7. *Тугай А.М., Орлов В.О.* Водопостачання: Підручник. К.: Знання, 2009. 735 с.
8. *ДБН В.2.5-74:2013* Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. К.: Мінрегіонбуд України, 2013. 172 с.
9. *ДСанПін 2.2.4-171-10.* Гігієнічні вимоги до води питної, призначення для споживання людиною. МОЗ України, 2010.
10. *Мякишев В.А.* Совершенствование технологии подготовки питьевой воды и внедрения СанПиНа. Пособие по дисциплине «Технология очистки природных вод». Симферополь: НАПКС, 2003. 203 с.
11. *Василенко О.А., Грабовський П.О., Ларкіна Г.М., та ін.* Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення: Навчальний посібник. К.: УВНВКП «Укргеліотех», 2010. 272с.
12. *Епоян С.М., Назарова Р.І., Коновалов О.М. та ін.* Фізико-хімічні методи обробки природних вод: Навчальний посібник. Х.: Видавництво «Точка», 2010. 262 с.
13. *Николадзе Г.И.* Технология очистки природных вод: Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1987. 479 с.
14. *Хоружий П.Д., Хомутецька Т.П., Хоружий В.П.* Ресурсозберігаючі технології водопостачання. К.: Аграрна наука, 2008. 534 с.
15. *Бабенков Е.Д.* Очистка воды коагулянтами. М.: Наука, 1977. 356с.
16. *Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Гетманцев С.В.* Коагуляция в технологии очистки природных вод. М.: Наука, 2005. 571 с.
17. *Куликов Н.И., Найманов А.Я., Омельченко Н.П., Чернышев В.Н.* Теоретические основы очистки воды: Учебное пособие. Донецк: Изд. «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2009. 298 с.
18. *Технология очистки природных вод / Л.А. Кульский, П.П. Строкач.* 2-е изд., перераб и доп. К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. 352 с.
19. *Епоян С.М., Сухоруков Г.І., Яркін В.А.* Існуючі споруди змішування природних вод і методи їх удосконалення// Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА, ХОТВАБУ. 2015. № 2 (80). С. 201- 205.
20. *Патент України* на винахід № 112131 МПК В01F 5/02 (2006.01). Перегородчастий змішувач / С.М. Епоян, В.А. Яркін, Д.Г. Сухоруков, Т.С. Айрапетян / Україна №201502578. Заявл. 23.03.2015. Опубл. 25.07.2016. Бюл. № 14. 4 с.
21. *Лапшев Н.Н.* Гидравлическое моделирование: Учебное пособие. Л.: ЛИСИ. 1980. 72с.
22. *Левы И.И.* Моделирования гидравлических явлений. М.: Госэнергоиздат, 1960. 320с.
23. *Сурин А.А., Городищев З.Я.* Исследование на моделях режима работы горизонтальных отстойников. Сборник научных работ ЛИИИКХ. Л., 1950. Вып.1.
24. *Вадзинский Р.* Статические вычисления в среде Excel. Библиотека пользователя. СПб.: Питер, 2008. 608с.

*Стаття надійшла до редакції 8.12.17*

М.А. ЗАХАРЧЕНКО, кандидат технічних наук

І.А. РИЖИКОВА

ТОВ «ФІТОПОТІК» (Наукові дослідження і екологічні проекти), м. Харків

## МЕТОДИКА ПО ЗМЕНШЕННЮ АНТРОПОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ МАЛИХ РІЧОК

*Стаття підготовлена на основі «Методики очищення та оздоровлення малих річок України з відновленням природного гідрологічного режиму», розробленої авторами під час роботи в УкрНДІЕП. Методика розроблена на основі фітотехнологій, що впроваджуються авторами, вона дозволить зменшити антропогенне навантаження на річки з сторони населених пунктів.*

**Ключові слова:** малі річки, водоохоронні заходи, фітотехнології.

*Статья подготовлена на основе «Методики очистки и оздоровления малой рек Украины с восстановлением природного гидрологического режима», разработанной авторами во время работы в УкрНИИЭП. Методика разработана на основе фитотехнологий, внедряемых авторами, она позволит уменьшить антропогенную нагрузку на реки со стороны населенных пунктов.*

**Ключевые слова:** малые реки, водоохраные мероприятия, фитотехнологии.

*The Article is prepared on the basis of "Methodology of cleaning and making healthy of the small rivers of Ukraine with proceeding in the natural hydrological mode", worked out by authors during work in UkrSRIEP. The Methodology is elaborated on the basis or phytotechnologies and aimed at mitigation of anthropogenic load on the rivers caused by dwelling localities.*

**Key words:** small rivers, water-protective measures, phytotechnologies.

**Стан проблеми.** Головними причинами загострення проблем раціонального використання водних ресурсів малих річок та їх охорони є антропогенне навантаження на заплаву, насамперед розміщення в межах водоохоронних зон та прибережно-захисних смуг об'єктів виробництва та звалищ твердих побутових відходів, відсутність в селищах, що розташовані вздовж берегів, каналізаційної мережі і очисних споруд, розорювання заплави для виробництва сільськогосподарської продукції.

Охорона малих річок на даний час зводиться до заборони будь-якої діяльності в заплаві та штрафних санкцій до промислових об'єктів і фізичних осіб, які скидають забруднені води до річкової мережі. Але це не вирішує ні проблеми їх охорони, ні проблеми, що зв'язані з умовами проживання людей на берегах річок [1,172]. Останні роки все частіше починає вживатись термін "ревіталізація" [2,8], який означає відновлення водотоків повністю чи певних їх ділянок на рівні періоду, який передував індустріальному освоєнню даної



території. Найбільш реальний шлях впровадження (за еколого-економічними критеріями) водоохоронних заходів для відновлення стану малої річки – використання елементів фітотехнологій. Але пристосування таких систем для умов заплави має ряд складнощів, а найважливіша з них є проблема відчуження необхідної площі для створення системи з перехвату забруднень. На наш погляд, актуальною задачею спеціалістів в галузі охорони вод є розробка системи комплексної охорони малих річок, яка б не заважала умовам проживання населення і одночасно дозволяла перехоплювати забруднення, які надходить до водотоку. Така система буде сприяти поліпшенню екологічного стану малих річок України та відновлювати їх первісний стан (або хоча б наблизитись до цього).

**Методика вибору водоохоронних заходів.** При впровадженні водоохоронних заходів на малих річках з метою відновлення їх первісного стану необхідно враховувати різні фактори, з яких найважливіший те, що річка це *постійно діюча природна водна артерія, яка знаходиться під впливом господарської діяльності людини*. В деяких місцях природні умови заплави сприяють очищенню поверхневого стоку до його надходження у річку. Як правило, це місця інтенсивного розвитку заростів вищих водних рослин, особливо повітряно-водних (очерет, рогіз, комиш, аїр, тощо). Даний тип рослин створює фітоценози не тільки у водному середовищі, а і безпосередньо на заплаві, займаючи її частину. Ці природні біоплато блокують підходи до річки, перехоплюючи малі забруднені потоки.

Як показали наші дослідження, традиційні очисні системи не враховують факт того, що долина малої річки – постійно діюча природно-техногенно- соціальної феномен. В даний час виявилось, що з існуючих систем очищення тільки фітотехнології враховують цей факт. Для визначення вибору водоохоронних заходів з урахуванням конкретних природно-техногенних умов населеного пункту на основі алгоритму була розроблена методика використання фітотехнологій з врахуванням елементів водної екосистеми.

### **Алгоритм вибору фітотехнологій для відновлення природного стану та захисту від забруднення малих річок України**

Наявність різних видів фітотехнологій створює проблему вибору їх при впровадженні водоохоронних заходів. Алгоритм вибору оптимальної схеми водоохоронних заходів складається з аналізу стандартних ситуацій, які дозволяють вибрати оптимальні варіанти фіто технологій.

Алгоритм включає три складові частини, які допомагають вибрати необхідні рішення для очищення поверхневого стоку (рис. 1).

Перша складова визначає характер забруднення, яке надходить до річки (з поверхневим стоком, з річковим притоком або від точкових скидів). Друга складова враховує антропогенні та природні елементи ландшафту, які приймають участь у формуванні поверхневого потоку. Третя складова визначає комплекс технічних рішень з ліквідації забруднення [3,217;4,170].

Запропонований підхід до створення систем очищення зворотних вод, що надходять до заплави ліквідує забруднення, яке надходить до річки з

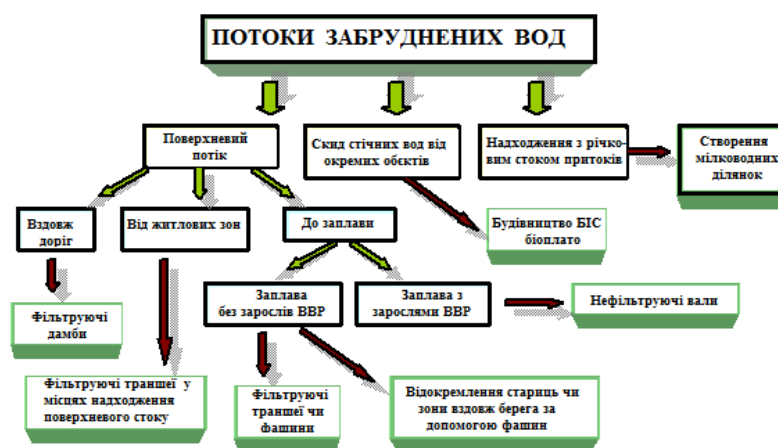


Рис.1. Схема вибору водоохоронних заходів на основі алгоритму використання фітотехнологій з врахуванням елементів водної екосистеми

бортів долини. Визначено, що в значній мірі за допомогою фітотехнологій можна вилучити з водного потоку до 30-40% забруднюючих речовин, що в разі випадків буває достатньо для покращення екологічного стану водного об'єкту чи навіть його повного відновлення – ревіталізації.

**Висновки.** Єдиний реальний шлях покращити екологічний стан малих річок – впровадження для їх захисту інженерних споруд на основі фітотехнологій. Такий шлях дозволяє забезпечити покращення екологічної обстановки в долині малої річки та бути економічно привабливими для впровадження, навіть силами самої місцевої громади.

Запропонований підхід до створення систем очищення у заплаві звичайно не ліквідує весь обсяг забруднення, що надходить до річки з бортів долини. Як показали розрахунки на прикладі р. Бик (притока р. Самара), перехоплення до 30-40% забруднень з поверхневого стоку досить для радикального покращення процесу самовідновлення екологічного стану водного об'єкту – його ревіталізації.

#### Список літератури

1. Рижикова І.А. Використання фіто технологій для перехоплення забруднення в долинах малих річок. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції. ч.2, 22-14 травня 2006р. Харків, 2006. С.172-174.
2. Хільчевський В. К. Гідроекологічні проблеми ревіталізації річок на території міських агломерацій – міжнародний та український досвід // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2017. Т. 2. С. 6-13
3. М. Захарченко, І. Рижикова. Розробка низько затратних природоохоронних заходів у басейні Західного Бугу. Матеріали I Міжнародної наук.-практ. конф. 22-24 травня 2008 р.. Луцьк.: Вежа. С.216-219.
4. Захарченко М.А., Рижикова І.А., Мельник Л.В. Вибір водоохоронних заходів в долині великих та малих річок України. Матеріали науково-практичної конф. «Вода та Довкілля» VI Міжнародного Водного Форуму «AQUA UKRAINE- 2008». К., 2008. С.169-172

Стаття надійшла до редакції 2.12.17

А.П. КАЛЮЖНИЙ, кандидат технічних наук

Л.Л. ЗУБРИЧЕВА

Е.Р. МИХАЙЛИК

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

## АСПЕКТИ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ МЕРЕЖ ВОДОВІДВЕДЕННЯ У СУЧАСНИХ УМОВАХ

*Проаналізовані аспекти гідравлічних розрахунків мереж водовідведення в сучасних умовах на прикладі малого міста, яке розташоване в центральній частині України. Наведено приклад креслень поздовжніх профілів головного колектора за проведеними розрахунками. Визначено найбільш придатні для використання таблиці з точки зору техніко-економічних розрахунків.*

**Ключові слова.** Гідравлічний розрахунок, таблиці гідравлічного розрахунку, водовідвідні мережі, стічна вода, труби, діаметр.

*Проанализированы аспекты гидравлических расчетов сетей водоотведения в современных условиях на примере малого города, расположенного в центральной части Украины. Приведен пример чертежей продольных профилей главного коллектора по проведенным расчетам. Определены наиболее приемлемые для использования таблицы с точки зрения технико-экономических расчетов.*

**Ключевые слова.** Гидравлический расчет, таблицы гидравлического расчета, водоотводящие сети, сточная вода, трубы, диаметр.

*The article has analyses aspects of hydraulic calculations of networks sewerage in modern conditions on the example of a small city which located in the central part of Ukraine. An example of drawings of the longitudinal profiles of the main collector is given in the calculations. There have been proposed a more economically expedient table.*

**Keywords.** Hydraulic calculation, hydraulic calculation tables, sewerage networks, wastewater, pipes, diameter.

**Постановка проблеми.** Для забезпечення нормального санітарно - гігієнічного стану населених пунктів повинен належно функціонувати весь комплекс каналізаційної системи. Необхідною умовою цього є правильно і якісно виконаний гідравлічний розрахунок мережі водовідведення. Проте удосконалення нових технологій та матеріалів водовідвідних мереж передбачають зміни у гідравлічному розрахунку трубопроводів.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

В джерелі [7,195] оцінено таблиці гідравлічного розрахунку водовідвідних труб за допомогою економічного фактора.

Економіко-технічні складові вартості мережі водовідведення залежно вибору таблиць гідравлічного розрахунку з урахуванням сучасних матеріалів розглядалися в роботі [8,33].

Розгляд можливих технічних рішень для забезпечення обґрунтованого проектування або реконструкції мережі водовідведення наведено в статті [9,150].

Проаналізовано використання альтернативних методик гідравлічного розрахунку каналізаційних трубопроводів з полімерних матеріалів [10, 43].

### **Виділення не розв'язаних раніше частин проблем.**

Гідравлічні розрахунки водовідвідних мереж складніші за гідравлічні розрахунки водопровідних мереж. Якщо гідравлічні розрахунки водопровідних мереж на теренах України виконуються за таблицями [5,116], то при виконанні гідравлічних розрахунків мереж водовідведення проєктанти іноді знаходяться в роздумах, які з відомих та чисельних таблиць для гідравлічного розрахунку каналізаційних мереж взяти за основу і чому.

**Мета статті** полягає у виборі оптимального варіанту таблиць гідравлічного розрахунку для виконання гідравлічних розрахунків мереж водовідведення при проектуванні чи реконструкції систем водогосподарського комплексу (ВКГ).

Для цього сформульовано такі завдання дослідження:

- проаналізувати теорію та розглянути основні принципи розрахунку;
- використати найпопулярніші таблиці [2,3,4] для гідравлічного розрахунку мереж водовідведення населеного пункту;
- побудувати повздовжні профілі водовідвідних колекторів за трьома розрахованими варіантами;
- обґрунтувати висновки щодо використання таблиць [2,3,4].

### **Виклад основного матеріалу.**

Системи водовідведення призначені для збору, транспортування, очищення і знезараження стічних вод та випуску їх у водойми. Стічні води у водовідвідній мережі рухаються в основному самопливом.

Для практичних розрахунків обрано місто, яке розташоване у центральній частині України на берегах водойми та має у своєму складі два райони різної щільності населення та ступенів благоустрою [7,194].

Вихідними даними до розрахунків є графіки притоку і відкачування стічних вод від населеного пункту; добова кількість стічних вод; геодезичні позначки місцевості, трасування мережі, довжини розрахункових ділянок.

Для раціонального проектування водовідвідних мереж потрібно так підібрати діаметри і позначки лотків колекторів, щоб вартість мережі була мінімальною. Також самопливні колектори повинні забезпечити пропуск

розрахункових витрат при допустимих самоочищувальних швидкостях руху стічної рідини [1,39].

Гідравлічний розрахунок являє собою складний процес, який враховує гідравлічні фактори дійсних фізичних явищ, котрі відображені в методах розрахунку. Водовідвідні труби відносяться до відкритих русел, так як мають вільну поверхню рідини, яка знаходиться під дією під дією атмосферного тиску. При цьому змочений периметр є лише частиною загального периметру живого перерізу. Основною формулою гідравлічного розрахунку руху стічної води в самопливних трубах є формула Шезі [6, 206].

$$U = C\sqrt{RI}, \quad (1)$$

де  $U$  – швидкість руху стічної води, м/с;  $C$  – коефіцієнт Шезі,  $R$  – гідравлічний радіус, м;  $l$  – гідравлічний ухил.

$$R = \frac{\omega}{\chi} \quad (2)$$

де  $\omega$  – площа живого перерізу труби, м<sup>2</sup>,  $\chi$  – змочений периметр, м.

Використовуючи формулу для визначення витрати  $Q = \omega \cdot U$ , отримаємо основну залежність, яка застосовується при гідравлічному розрахунку відкритих русел.

$$Q = \omega \cdot C\sqrt{RI}. \quad (3)$$

Для підвищення якості та скорочення термінів розрахунку використовуємо програму Microsoft Excel. Водовідвідна мережа міста обраховувалася три рази за різними таблицями [2,3,4]. За результатами гідравлічних розрахунків побудовані повздовжні профілі колекторів.

Для того щоб чіткіше було видно різницю прокладання головного колектора при використанні різних таблиць гідравлічного розрахунку частини повздовжніх профілів головного каналізаційного колектора винесено на одне креслення (рис.1). На рис.1а наведено профіль побудований згідно розрахунків за таблицями [3], рис. 1б відображає профіль каналізаційного колектора відповідно гідравлічних розрахунків за джерелом [2]. Повздовжній профіль головного колектора виконаний за [4] показано на рис. 1в. Таким чином простіше провести порівняння.

У всіх варіантах розрахунків прийнята однакова початкова глибина закладання, яка складає 1,50 м. Жирним шрифтом виділено варіанти з порівняно найбільшою глибиною закладання чи діаметром.

Аналізуємо ділянку 0-1. Найменший діаметр підібраний за таблицями [3], проте глибина закладання згідно цих таблиць є найбільшою. На ділянці 1-2 діаметри за таблицями [3] і [4] рівні, але глибина закладання при розрахунку за таблицями [4] є найменшою, а за таблицями [3] – найбільшою.

На ділянці 2-3 і глибина закладання і діаметр є найменшим при користуванні таблицями [4], а найбільшими – при користуванні таблицями [3]. На наступній ділянці 3-4 діаметр є найменшим за таблицями [2]. За

таблицями [4] і [3] діаметри однакові, проте глибина закладання при користуванні джерелом [4] є найменшою, а при користуванні таблицями [3] – найбільшою.

Розглядаємо ділянку 4-5. Найбільший діаметр підбрано за таблицями [3], а за двома іншими варіантами таблиць – діаметри рівні. Проте труби за таблицями [2] прокладаються глибше порівняно з двома іншими варіантами, а за таблицями [4] глибина закладання є найменшою.

Ділянка 5-6: найменші глибина закладання і діаметр будуть при використанні таблиць [4]. Найбільший діаметр пропонують таблиці [3], а згідно таблиць [2] підбрано менший діаметр, але більшу глибину закладання. На наступній ділянці 6-7 найбільший діаметр отримаємо при користуванні таблицями [2]. В двох інших випадках отримаємо однакові діаметри, але найменшу глибину закладання при користуванні таблицями [4] і найбільшу – при користуванні таблицями [3].

На ділянці 7-8 діаметр за трьома варіантами отримаємо однаковий, проте звертаємо увагу на глибину закладання головного каналізаційного колектора. При розрахунку за таблицями [4] глибина найменша, а за таблицями [2] найбільша.

На останній ділянці 8-9 діаметр і глибини закладання є найменшими за таблицями [4]. За двома іншими варіантами таблиць діаметри однакові, різниця лише в глибині закладання. За таблицями [2] глибина буде більшою ніж за таблицями [3].

Отже, при використанні таблиць [3] підбрані труби діаметром від 200 до 900 мм, а в кінці головного колектору глибина закладання трубопроводу становить 5,80 м. При використанні таблиць [2] діаметри труб в діапазоні – 250...900, глибина закладання колектору на ділянці 8-9 сягає 6,40 м. При використанні таблиць [4] діаметри труб від 250 мм до 800 мм, а кінцева – 5,22 м.

### **Висновки**

1. Виконані розрахунки та побудовані повздовжні профілі головного каналізаційного колектора 0-9, що дало можливість визначити найбільш раціональне конструктивне виконання креслення профілів водовідвідної мережі.

2. Позитивними чинниками використання таблиць [4] є зменшення капітальних затрат на прокладання, ремонт або реконструкцію мережі від 10% порівняно з таблицями [3] та до 25% порівняно з таблицями [2] із збереженням повної пропускнуєї спроможності системи водовідведення.

3. Визначення ефективного співвідношення між витратою стічної води, діаметром труб, ухилом та матеріалом труб дає змогу суттєво зменшити витрати на матеріали та знизити собівартість відведення стічної води.

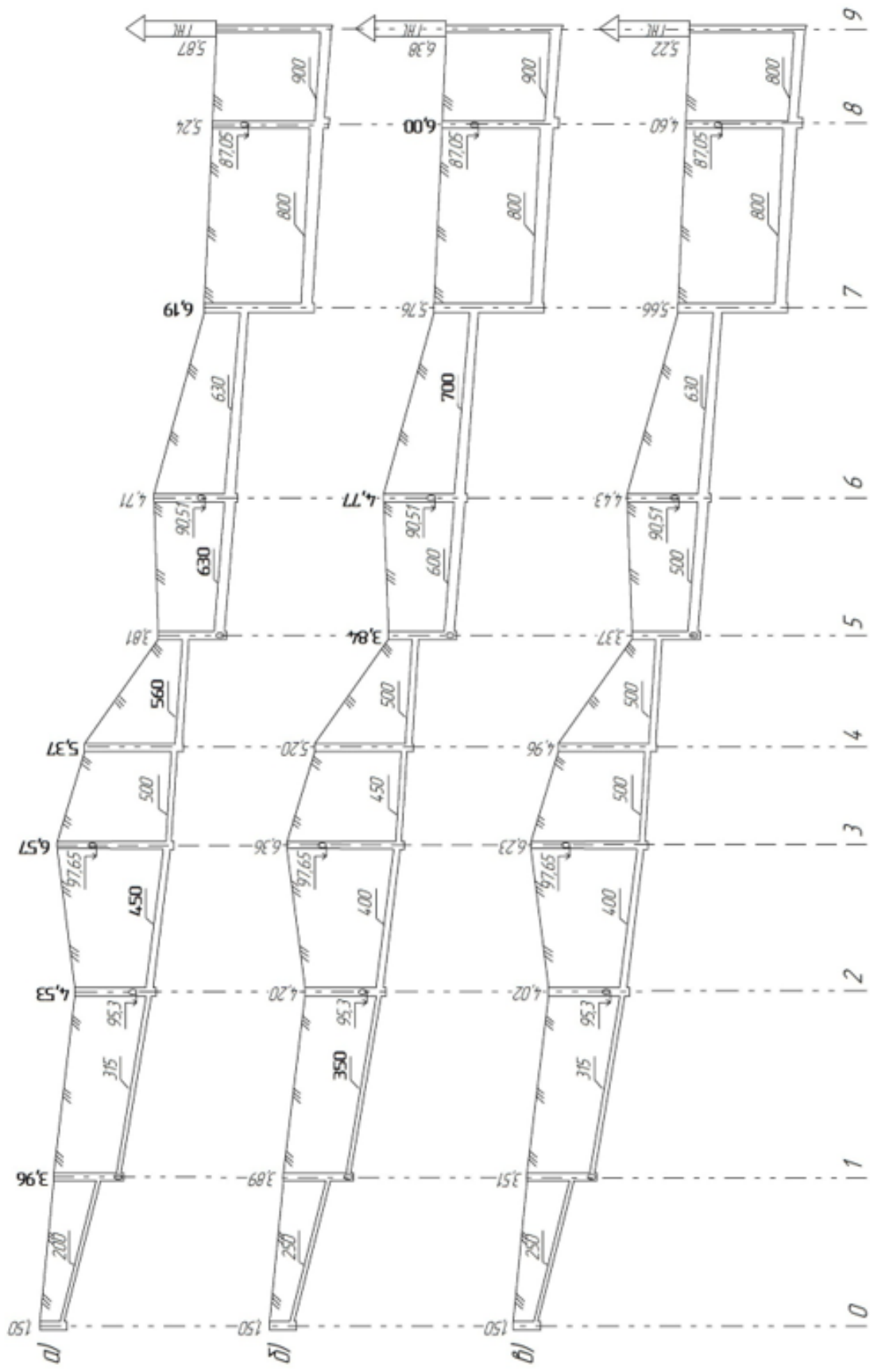


Рис. 1. Частини повздовжніх профілів головного каналізаційного колектора.

4. Зменшення тарифу на воду та водовідведення, що включає в себе і собівартість, можливе при зниженні капітальних та експлуатаційних затрат і підтверджує актуальність проблеми і необхідність подальших науково-теоретичних досліджень.

Отже, при використанні таблиць [3] підібрані труби діаметром від 200 до 900 мм, а в кінці головного колектору глибина закладання трубопроводу становить 5,80 м. При використанні таблиць [2] діаметри труб в діапазоні – 250...900, глибина закладання колектору на ділянці 8-9 сягає 6,40 м. При використанні таблиць [4] діаметри труб від 250 мм до 800 мм, а кінцева – 5,22 м.

### **Висновки**

1. Виконані розрахунки та побудовані повздовжні профілі головного каналізаційного колектора 0-9, що дало можливість визначити найбільш раціональне конструктивне виконання креслення профілів водовідвідної мережі.

2. Позитивними чинниками використання таблиць [4] є зменшення капітальних затрат на прокладання, ремонт або реконструкцію мережі від 10% порівняно з таблицями [3] та до 25% порівняно з таблицями [2] із збереженням повної пропускнуєї спроможності системи водовідведення.

3. Визначення ефективного співвідношення між витратою стічної води, діаметром труб, ухилом та матеріалом труб дає змогу суттєво зменшити витрати на матеріали та знизити собівартість відведення стічної води.

4. Зменшення тарифу на воду та водовідведення, що включає в себе і собівартість, можливе при зниженні капітальних та експлуатаційних затрат і підтверджує актуальність проблеми і необхідність подальших науково-теоретичних досліджень.

### **Список літератури**

1. *ДБН В. 2.5. – 75: 2013* Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Київ.: МРРБ та ЖКГ України, 2013. 210 с
2. *Лукиних А.А., Лукиних Н.А.* Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н.Н. Павловского / 4-е изд, доп. М.; Стройиздат, 1974. 156 с.
3. *Карелин Я.А.* Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей из пластмассовых труб круглого сечения: справочное пособие / М.: Стройиздат, 1986. 53 с.
4. *Корсис.* Безнапорная и ливневая канализация: техническое руководство К: Группа поли пластик, 2011. 44 с.
5. *Шевелев Ф.А.* Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб/ Ф.А. Шевелев, А.Ф. Шевелев // Справ. пособие. 8-е изд., перераб. и доп. М: ООО «БАСТЕТ», 2007. 336с.
6. *Константинов Ю.М., Гіжа О.О.* Технічна механіка рідини і газу:



Підручник. К.: Вища шк., 2002. 277 с.: іл..

7. *Калюжний А.П.* Економічне порівняння варіантів гідравлічного розрахунку мережі водовідведення / А.П.Калюжний, Л.Л. Зубричева, О.О. Кривенко // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. пр. Вип.№1 (83). Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. С. 193-196.

8. *Калюжний А.П., Зубричева Л.Л.* Оцінювання відповідності таблиць гідравлічного розрахунку водопровідних труб сучасним матеріалам труб // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА, № 27, 2016. С. 149-155.

9. *Kalyuzhniy A.P.* Comparison of the hydraulic calculations tables networks sewerage» A.P.Kalyuzhniy L.L. Zubricheva, O.O. Kryvenko // Сборник научных трудов «Energy, energy saving and rational nature use», 2015, Вып №2 (5) С.32-35.

10. *Аверкеев И.* Сравнительный анализ альтернативных методик гидравлического расчета канализационных трубопроводов из полимерных материалов // Журнал: «Полімерні труби – Україна». Вип.№4 (37). К: Група поліпластик, 2015. С. 42-45.

*Стаття надійшла до редакції 20.11.17*

О.М. КВАРТЕНКО, кандидат технічних наук  
Національний університет водного господарства та природокористування,  
м. Рівне

Л.А. САБЛІЙ, доктор технічних наук  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»

## **ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТАНЦІЇ ОЧИЩЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД В УМОВАХ ЗМІН ГІДРАВЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

*В роботі наведено результати досліджень щодо впливу різних за тривалістю технологічних перерв на якість фільтрату станції знезалізнення. Вивчено ефективність очищення підземних вод при змінному, протягом фільтроциклу, гідравлічному навантаженні. Встановлено, що запропонована технологія дозволяє досягти стабільного ефекту очищення в даних умовах при вмісті заліза до 8,0 мг/дм<sup>3</sup>, азоту амонійного до 1,0 мг/дм<sup>3</sup>, розчинених органічних сполук до 6,0 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>.*

**Ключові слова:** біореактор, гідравлічне навантаження, залізобактерії, інтенсивність промивки.

*В работе приведены результаты исследований влияния различных по продолжительности технологических перерывов на качество фильтрата станций обезжелезивания. Изучена эффективность очистки подземных вод при изменяющейся, на протяжении фильтроцикла, гидравлической нагрузке. Установлено, что предложенная технология позволяет достичь стабильного эффекта очистки в данных условиях при содержании железа до 8,0 мг/дм<sup>3</sup>, азота аммонийного до 1,0 мг /дм<sup>3</sup>, растворенных органических соединений до 6,0 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>.*

**Ключевые слова:** биореактор, гидравлическая нагрузка, железобактерии, интенсивность промывки.

*The proposed paper considers consequences of using various power saving ways of water supply upon the efficiency of operating stations treating underground waters. The aim of this paper is to study the efficiency and reliability of operating the technological equipment designed for treating multi-component underground waters in conditions of the irregularity of the specific hydraulic loading during day and night. It is established that the proposed technology allows to achieve a stable purification effect in these conditions from ferrum compounds (up to 8,0 mg/dm<sup>3</sup>), ammonia nitrogen (up to 1,0 mg/dm<sup>3</sup>, dissolved organic substances (PO up to 6,0 mgO<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>).*

**Key words:** bioreactor, changing hydraulic load, iron bacteria, washing intensity.

**Вступ.** В умовах збільшення тарифів на електроенергію багато станцій очищення природних вод переходять на подачу води за декількома схемами. Перша передбачає роботу станції у форсованому режимі у нічні години за зменшеним тарифом, з метою максимального наповнення резервуарів чистої води, та подальшою плановою перервою подачі води на технологічне обладнання. Інша схема передбачає використання частотних перетворювачів, які дозволяють синхронізувати роботу насосного обладнання з витратами води населеним пунктом.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** За результатами досліджень [1,2] встановлено, що при технологічній зупинці фільтрів більш ніж на три години концентрація кисню в піщаному завантаженні зменшується до нуля, і починаються процеси відновлення сполук феруму та мангану. Концентрація заліза у пробах фільтрату становила при цьому  $1,0 \text{ мг/дм}^3$ , а нормальна робота фільтрів відновлювалася через 1,5 години після поновлення фільтроциклу. При тривалості зупинки фільтрів більш ніж на 24 години в пробі фільтрованої води все залізо знаходилося у двовалентній формі. При цьому концентрація  $\text{Fe}^{2+}$  перевищувала  $10 \text{ мг/дм}^3$  при концентрації заліза у вихідній воді до  $2,0 \text{ мг/дм}^3$  [2]. Робота фільтрів нормалізувалася повністю тільки через 4 години після відновлення фільтроциклу. Це було пов'язано із зміною співвідношень різноманітних груп залізобактерій в матриксних структурах міжпорового простору. Кількість залізоредакуючих бактерій становила  $2 \cdot 10^9$  кл/мл [2]. Результатом їх діяльності було відновлення сполук заліза в товщі фільтруючого завантаження з їх подальшим вимиванням у резервуари чистої води (РЧВ) та надходженням у водопровідну мережу населеного пункту. Тому технологічні зупинки фільтрів більш ніж на три години є недоцільними з точки зору як експлуатації водоочисного обладнання, так і надійності роботи водоочисної станції. В роботі [3] досліджено систему «біореактор – фільтр» при безперервній подачі води на водоочисне обладнання із зміною середньодобових витрат води при концентраціях феруму у вихідній воді від  $2,64$  до  $8,83 \text{ мг/дм}^3$ , мангану  $0,1 \dots 0,14 \text{ мг/дм}^3$ , рН  $6,86 \dots 7,17$ , перманганатній окисності  $1,9 \dots 2,1 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ . Швидкості фільтрування підтримували в межах  $13,7 \dots 27,3$  м/год для біореакторів та  $8,7 \dots 16,7$  м/год для освітлювальних фільтрів. Встановлено, що із збільшенням тривалості роботи технологічного обладнання покращується ефективність його роботи. Тривалість роботи біореактора в даних умовах не перевищувала 7 діб, освітлювальних фільтрів 24 години.

У випадку встановлення на водоочисній станції частотних перетворювачів спостерігається нерівномірність гідравлічного навантаження на водоочисне обладнання протягом всієї доби. Тому вивчення питання

ефективності роботи системи споруд «біореактор – фільтр» в цих умовах є актуальним.

**Мета та завдання.** Вивчення ефективності та надійності роботи технологічного обладнання, призначеного для очищення багатокомпонентних підземних вод в умовах нерівномірності питомого гідравлічного навантаження протягом доби.

**Виклад основного матеріалу.** В результаті проведених досліджень вивчали ефективність очищення води від сполук заліза, азоту амонійного, фенолів, розчинених легкоокиснюваних органічних сполук при коливанні значень питомих гідравлічних навантажень на очисні споруди протягом фільтроциклу. Дослідження проводили на станції біологічного знезалізнення в Рівненській області. До складу технологічної схеми (рис. 1) входили: біореактор, три гравітаційних пінополістирольних фільтри, електролізна установка «Полум'я-2», насос-дозатор гіпохлориту натрію, РЧВ, насоси другого підйому, блок стабілізаційної обробки води.

Після біореактора вода надходила з швидкістю 5...8 м/год на фільтри ФПЗ-1, забезпечуючи очищення від зависі гідроксиду заліза та частинок матриксів залізобактерій. В якості фільтруючого завантаження використовували гранульований пінополістирол марки ПСВ або ПСВ-С за ОСТ 202-05-92 і ОСТ 301-05-92Е. Верхній розподільчий шар прийнято товщиною 200 мм з діаметром гранул 4...8 мм. Діаметр гранул робочого шару складав 1,0...2,5 мм, а його робоча висота 1000 мм. Фільтри було обладнано системою гідравтоматичної промивки на базі сифонів конструкції «труба в трубі».

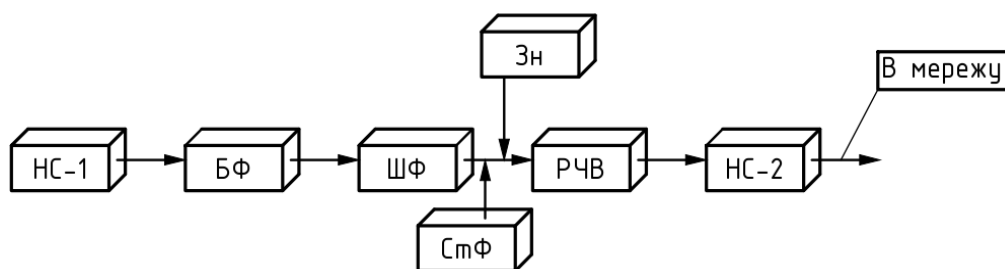


Рис. 1. Технологічна блок-схема очистки підземних вод:

НС-1 – свердловина із зануреним насосом 1-го підйому;  
БФ – біореактор; ШФ – освітлювальний пінополістирольний фільтр;  
СтФ – блок стабілізаційної обробки фільтрату; Зн – вузол знезараження води гіпохлоритом натрію; РЧВ – резервуар чистої води; НС-2 – насосна станція 2-го підйому

В 2012 – 2014 роках, за ініціативою та силами співробітників місцевого водоканалу, було впроваджено енергозберігаючу систему подачі води. Це призвело до практично безперервної роботи станції, в умовах деякої нерівномірності гідравлічного навантаження на водоочисне обладнання. В

результаті чого з'явилася можливість дослідження його роботи в нових режимах експлуатації.

У листопаді 2016 року були проведені дослідження щодо визначення ефективності роботи даної системи. Параметри якості вихідної води становили:  $\text{Fe}^{2+}$  1,7...1,9 мг/дм<sup>3</sup>, бікарбонатна лужність 3,96 ммоль/дм<sup>3</sup>, рН 6,9...7,2; перманганатна окисність 3,6...4,0 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, концентрація азоту амонійного 0,5...0,65 мг/дм<sup>3</sup>, фенолів 0,025...0,028 мг/дм<sup>3</sup>.

Фільтроцикл проводили з 12.11.16 по 13.11.16 року при змінних витратах води, від 13 до 40 м<sup>3</sup>/год, та швидкостях фільтрування: в біореакторі – від 2,5 до 8 м/год, фільтрах – від 1,5 до 3,5 м/год (рис. 2). Фільтри промивали раз на дві доби. При цьому в нижній – осадовій частині біореактора та у підфільтровому просторі пінополістирольного завантаження відбувалося поступове накопичення завислого шару осаду з продуктів метаболізму залізобактерій у вигляді біомінералів *bio-FeOOH*. В результаті промивок цей осад видаляється за межі апаратів. Результати досліджень свідчать про стабільну роботу системи «біореактор – фільтр» протягом всього терміну фільтроциклу у 48 годин, незважаючи на зміну витрат вихідної води та швидкостей фільтрування.

Ефективність видалення легкоокиснюваних органічних сполук та заліза становили, відповідно, від 62 до 79% та від 87% до 98% (рис. 2).

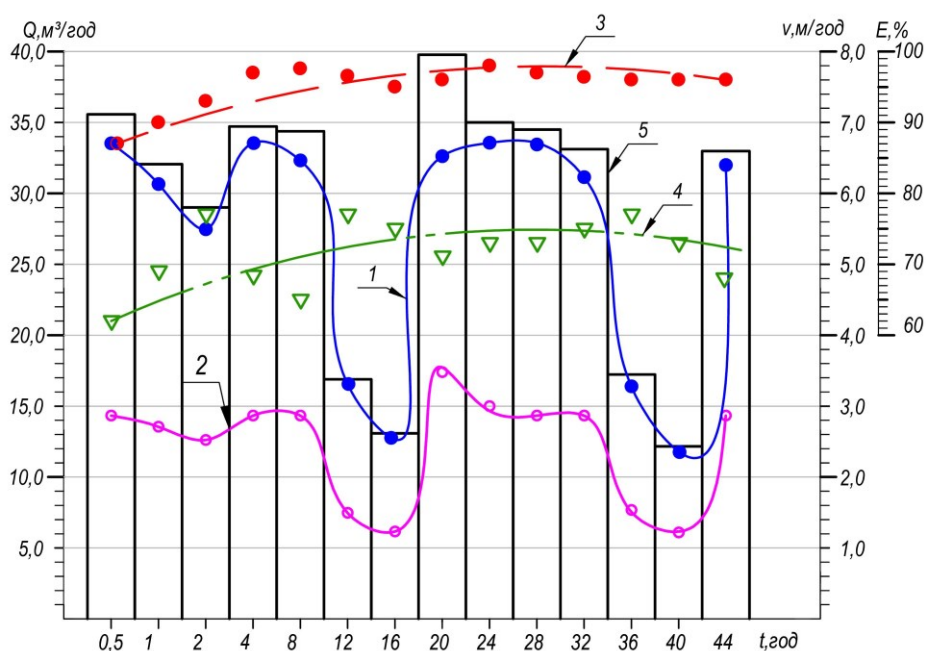


Рис. 2. Зміна погодинних витрат, швидкостей фільтрування та ефективності знезалізнення протягом фільтроциклу: 1 – швидкість у біореакторі; 2 – швидкість на фільтрах; 3 – ефективність знезалізнення після фільтрів; 4 - ефективність видалення органічних речовин за ПО після фільтрів; 5 – погодинні витрати води

Крім того, вже через годину після початку фільтроциклу з води було повністю видалено такі складні для очищення сполуки як азот амонійний та феноли (рис. 3). Величини бікарбонатної лужності практично не змінювалися і знаходилися в межах 3,84...4,0 ммоль/дм<sup>3</sup>. Використання двоступеневої схеми з одним біореактором на декілька освітлювальних фільтрів дозволяє знизити навантаження на останні, збільшивши тривалість фільтроциклів до 48 годин.

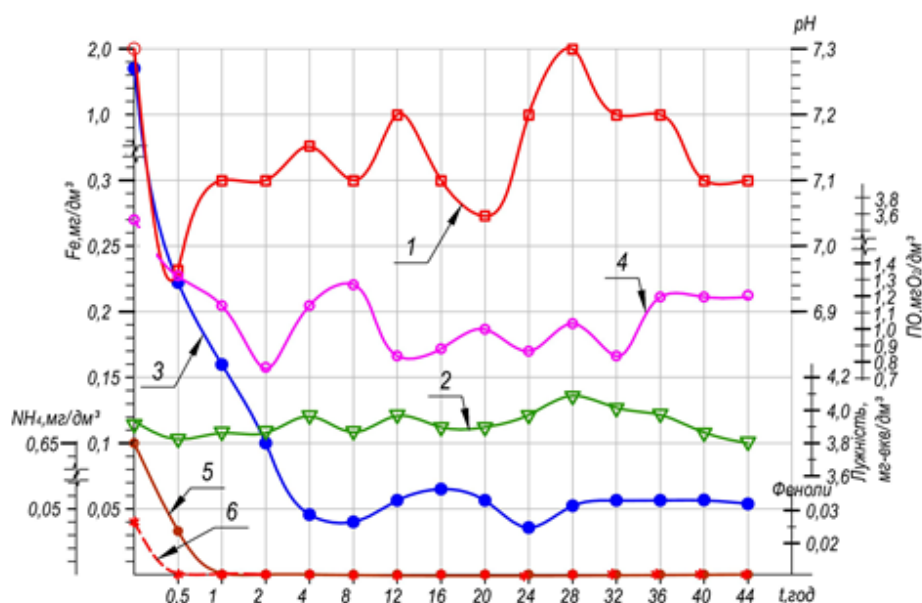


Рис. 3. Зміна параметрів якості очищеної води впродовж фільтроциклу: 1 – величини pH; 2 – бікарбонатної лужності; 3 – сполук заліза; 4 – перманганатної окисності; 5 – азоту амонійного; 6 – фенолів

Зростання тривалості фільтроциклу при біохімічному методі пояснюється утворенням в міжпоровому просторі контактного та фільтруючих завантажень осаду із матриксів залізобактерій, який завдяки своїй структурі [4 – 7] здатний до малого приросту втрат напору. Промивка фільтрів відбувалася як в гідроавтоматичному, так і ручному режимах. Проведені порівняльні дослідження щодо визначення ефективності та тривалості промивок фільтрів в один та два ступені.

На рис. 4 наведено характерні криві виносу осаду гідроокису заліза із промивною водою, а на рис. 5 – фотографії проб промивної води, відібраної через відповідні проміжки часу від початку промивки фільтрів.

Із наведених результатів видно, що в перші 10 секунд від початку I-го ступеня спостерігали найвищу інтенсивність промивки (рис. 4, крива 1). В результаті чого відбувався процес зрушення відкладень матриксних структур із міжпорового простору. При подальшій промивці інтенсивність її знижувалася до 30 дм<sup>3</sup>/(с·м<sup>2</sup>), а концентрація заліза, яке вимивалося із завантаження, досягала свого піку. В наступні 90 секунд інтенсивність

промивки була сталою, а концентрація заліза, яке вимивалося із міжпорового простору, поступово зменшувалася. При досягненні розрахункового рівня води у надфільтровому просторі, I ступінь промивки закінчувалася. Засувка на скидному трубопроводі закривалася та починався набір фільтрату до промивного баку, після наповнення якого промивка поновлювалася (рис. 4, крива 2). Величини інтенсивностей II-го ступеня промивки були аналогічними інтенсивностям першого ступеня, але кількість заліза у промивній воді була значно меншою, про що свідчать фото, представлені на рис. 5.

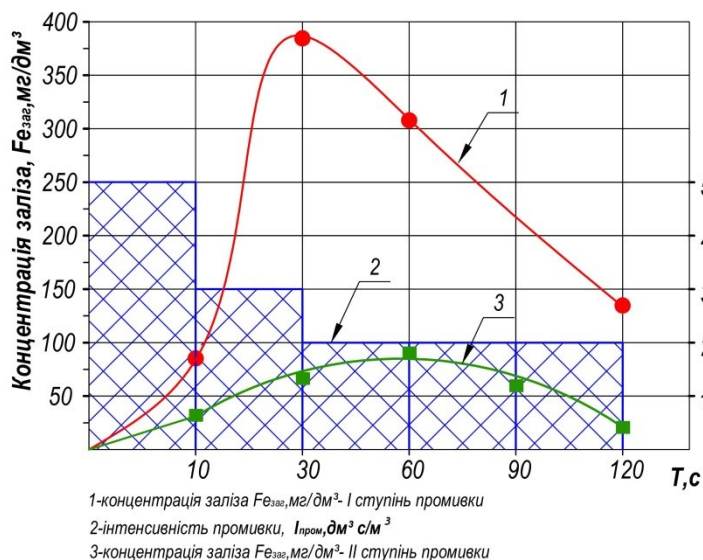
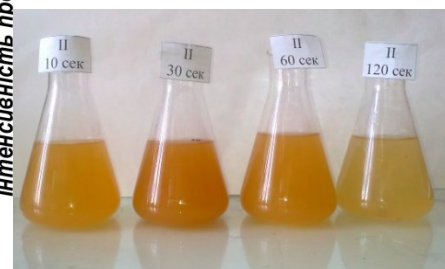


Рис. 4. Кінетика виносу забруднень при двоступеневій промивці: 1 – концентрація заліза I ступінь промивки; 2 – зміна інтенсивності промивки; 3 – концентрація заліза II – ступінь промивки



а



б

Рис. 5. Проби промивної води після фільтра в різні проміжки часу:  
 а – I ступінь промивки;  
 б – II ступінь промивки

Запропонована та апробована протягом восьми років експлуатації технологія дозволяє проводити очищення та кондиціонування природних агресивних, біля нейтральних вод із нормальним лужним резервом від сполук заліза (до  $8,0 мг/дм^3$ ), азоту амонійного (до  $1,0 мг/дм^3$ ), розчинених органічних речовин (за ПО до  $6,0 мгO_2/дм^3$ ), фенолів (до  $0,03 мг/дм^3$ ) із одночасною стабілізаційною обробкою фільтрату (дозою освітленого розчину  $Ca(OH)_2$   $8...16 мг/дм^3$ ). Технологію захищено патентом України на винахід.

**Висновки.** В результаті застосування біохімічного методу знезалізнення в міжпоровому просторі контактного та фільтруючих завантажень утворювався осад із матриксів залізобактерій, який завдяки своїй структурі був здатним до малого приросту втрат напору, що призводило до збільшення тривалості фільтроциклу. Система «біореактор – фільтр» дозволяла отримувати стабільний ефект очищення води при зміні

гідравлічного навантаження на водоочисне обладнання впродовж фільтроциклу.

### Список літератури

1. Букреева В.Ю. Сорбция коллоидных соединений оксидов железа и марганца с помощью железобактерий на песчаных загрузках очистных сооружений водоподъемных станций / В.Ю. Букреева, М.Ю. Грабович, А.Т. Епринцев, Г.А. Дубинина // Сорбционные и хроматографические процессы. 2009. Т. 9. Вып. 4. С. 506–514.

2. Букреева В.Ю. Экологическая роль железобактериальных биообрастаний в повышении эффективности песчаных фильтров очистных сооружений водоподъемной станций (на примере г. Воронежа). Автореферат дис. на соискание ученой степени канд. биол. наук. Воронеж, 2011. Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «ВГУ».

3. Zhurba M.G. Studies and experience of introducing innovative technologies of ground water conditioning / M.G.Zhurba, O.B. Govorov Zh.M. Govorova., A.N.Kvartenko // Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika. 2014, no. 9. pp. 38-49.

4. Mouchet, P. From Conventional to Biological Removal of Iron and Manganese in France/ P. Mouchet // Journal of the American Water Works Association. 1992, vol. 84, no 4, p. 158-167.

5. Mouchet P. Biological Filtration for Iron and Manganese Removal: Some Case Studies// WQTC 95 (AWWA) New Orleans LA Nov. 1995. p . 12-16.

6. Du Toit G. Biological filtration for sustainable treatment of groundwater with high iron content - a case study // G. du Toit, H. Blignaut, B. Theunissen, J. Briggs// Water SA. 2014.

7. Sharma, S.K. Biological iron removal from groundwater/ S.K. Sharma, B. Petrusevski, J.C. Schippers// Water Supply. 2005, no. 54(4): p. 239-247.

*Стаття надійшла до редакції 8.12.17*



## СИСТЕМНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ НАУКОВОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ РЕСТРУКТУРИЗАЦІЇ ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА

*Розглянута методологія реформування системи житлово-комунального господарства України. Запропоновано застосування процесного підходу до опису структури ЖКГ з метою вирішення задачі її системної модернізації.*

**Ключові слова:** реформа житлово-комунального господарства, процесний підхід.

*Рассмотрена методология реформирования системы жилищно-коммунального хозяйства Украины. Предложено применение процессного подхода к описанию структуры ЖКХ с целью решения задачи ее системной модернизации.*

**Ключевые слова:** реформа жилищно-коммунального хозяйства, процессный подход.

*The methodology of reforming the system of housing and communal services of Ukraine is considered. The application of the process approach to the description of the structure of housing and communal services is proposed in order to solve the problem of its system modernization.*

**Key words:** reform of housing and communal services, process approach.

Модернізація житлово-комунального господарства України є складною структурованою системною задачею, що вимагає термінового вирішення. Важливою складовою успіху у розв'язанні даної проблеми є окреслення та деталізована розробка наукових основ, методології та конкретних науково обґрунтованих підходів до даної проблеми.

Слід зауважити, що єдиною прийнятною науковою платформою у створенні методології реструктуризації та реінжинірингу галузі ЖКГ є системний підхід. В зв'язку з цим слід визначити декілька принципових моментів.

1. Житлово-комунальний комплекс слід розглядати як складноструктуровану ієрархічну трансформовану систему, що загалом складається з наступних рівнів:

- загальнодержавний рівень (галузь в цілому);

- регіональний рівень, визначений у межах укрупнених територіальних одиниць, територіальних кластерів, міжгалузевих об'єднань тощо;
- рівень об'єднань спеціальних та супутніх підприємств на рівні об'єднаних територіальних громад, окремих міст тощо;
- рівень окремо визначеного підприємства (локалізований розгляд);
- рівень елементів інфраструктури комунального підприємства (слід розглянути структуризацію з позицій як побудови організаційно-технічної системи, так і інженерно-технологічних її складових, побудови систем фінансового та кадрового супроводу тощо).

2. Важливим елементом системного розгляду галузі в цілому та підприємств ЖКГ є визначення типології, систематизації та визначення типологічно оптимальних організаційних структур, прив'язаних до регіональних особливостей, ресурсної бази, наявності власних та залучених коштів для проведення системної реструктуризації та реінжинірингу.

3. Принциповим моментом системного розгляду є часовий параметр – динамічність системи що розглядається. Зрозуміло, що навіть на рівні окремого підприємства динамічність системи визначається як комплексом зовнішніх факторів (законодавчого, фінансово-інвестиційного порядку, інституційних і т.ін.), так і необхідністю застосування методів щодо постійного вдосконалення внутрішньої структури та функціональності підприємства.

4. З огляду на вказане в п. 3 принципового значення набуває необхідність розробки узагальнених та спеціальних моделей трансформації системи ЖКГ та її підсистем на всіх рівнях визначеної ієрархії. Оскільки в багатьох випадках елементи системи (особливо, на функціональному рівні) підлягають впливу значної кількості випадкових факторів, в розробці моделей реструктуризації та реінжинірингу доцільно використовувати ефективний апарат теорії нечітких множин.

5. В свою чергу, в якості інструментарію створення та моніторингу власне моделей трансформації складної системи «ЖКГ» ефективним є застосування візуально-геометричних та графоаналітичних уявлень. Зокрема, одним з таких інструментів є ергономічна та комфортна з точки зору інтерфейсу модель – діаграми Сенкі, за допомогою яких можна наочно кількісно визначити та розрахувати значення та напрями рухів будь-яких ресурсних потоків у певній складній системі.

6. Методологія та інструментарій реструктуризації та реінжинірингу системи ЖКГ мають бути відкритими до можливості реформування будь якого з її рівнів за проблемно-орієнтованим принципом. Проблема орієнтація трансформацій може полягати у визначенні цільових функцій, що відповідають вимогам екологічності, енергоощадності, біосферної сумісності, задачі створення «розумного» міста тощо.

7. В якості концептуальної основи створення наукової платформи реструктуризації, з нашої точки зору, досить ефективним може виявитись використання процесного підходу [1].

Процесний підхід – це розгляд всієї діяльності організації як мережі взаємодіючих процесів, що протікають усередині організаційної структури компанії і реалізують мету її існування [1]. Він дозволяє визначити причинно-наслідкові зв'язки виникнення проблем, а також з'ясувати, де і коли виникла проблема, і яка з підсистем винна у її виникненні.

Таким чином, підприємство являє собою систему, усередині якої відбувається множина взаємозв'язаних процесів, які своїм функціонуванням визначають стан всієї організаційної системи. Але стани, в яких перебуває система, викликані певними діями в результаті процесу. У свою чергу стани викликають подальші дії, що знаходяться в логічно послідовному ланцюзі процесу. Задіяні в процесі ресурси перетворюються і знаходять іншу форму.

Функції процесного підходу також являють собою певну систему, де управлінський цикл виглядає наступним чином: збирання інформації – прийняття управлінського рішення – організація (формування об'єкта і суб'єкта управління) – регулювання – облік – контроль. Важливо, що вказаний підхід може використовувати як на елементарному функціональному рівні, так і на рівні мета систем.

Отже, поєднання принципів процесного підходу до опису структур та функціональних схем роботи підприємства з можливостями математичного та візуально-графічного моделювання дозволяє підійти до вирішення задачі трансформування системи ЖКГ з дійсно системних позицій.

### **Список літератури**

1. Швець В.Я., Дроботова М.В., Музичка А.Р. Процесний підхід до управління підприємством//Сталий розвиток економіки, № 1 (18), 2013. С.74-78.

*Стаття надійшла до редакції 4.12.17*

А.О. КОЛОДЬКО, аспірант

Г.М. КОЧЕТОВ, доктор технічних наук

Д.М. САМЧЕНКО, кандидат технічних наук

Київський національний університет будівництва і архітектури

А.В.ПАСЬКО, аспірант

Науково дослідний інститут в'язучих речовин і матеріалів

ім. В.Д. Глуховського

## **ВИВЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ВІДХОДІВ ОЧИСТКИ ПРОМИСЛОВИХ СТІЧНИХ ВОД У СКЛАДІ ЛУЖНИХ ЦЕМЕНТІВ**

*Встановлено доцільність використання як очищеної води, так і осадів переробки промислових стічних вод методом феритизації у складі лужних цементів загальнобудівельного призначення. Досліджено кінетику вилуговування іонів важких металів і доведено їх надійну фіксацію у структурі лужних цементів.*

**Ключові слова:** стічні води, феритизація, осади, лужний цемент, вилуговування.

*Установлена целесообразность использования в качестве очищенной воды, так и осадков переработки промышленных сточных вод методом ферритизации в составе щелочных цементов общестроительного назначения. Исследована кинетика выщелачивания ионов тяжелых металлов и доказана их надежную фиксацию в структуре щелочных цементов.*

**Ключевые слова:** сточные воды, ферритизация, осадки, щелочной цемент, выщелачивания.

*The possibility of using both treated water and sediments after industrial wastewater treatment by ferritation method in the composition of alkaline cements for general construction purpose is established. The kinetics of heavy metal ions' leaching has been investigated and their reliable fixation in the structure of alkaline cements has been proved.*

**Key words:** wastewater, ferritization, sediments, alkaline cement, leaching.

Одними з найбільш розповсюджених забруднювачів навколишнього середовища техногенного походження є стічні води гальванічних виробництв. Тому інтенсивний розвиток сучасної промисловості вимагає застосування ефективних технологій очистки таких вод з метою збереження навколишнього середовища.

Досвід обстеження гальванічних виробництв різних промислових підприємств свідчить про те, що відпрацьовані висококонцентровані розчини (електроліти, розчин після регенерації іонообмінних фільтрів) становлять 2...5% від загального обсягу стічних вод промислових підприємств. У той же час вміст забруднюючих речовин в них становить 45...75% від їх загального об'єму. Стічні води гальванічних виробництв містять значну кількість високотоксичних сполук нікелю, частка яких сягає 20% від загального вмісту важких металів. Викид у довкілля цих стічних вод крім екологічного збитку приводить також до втрати коштовного металу, природні джерела якого обмежені.

Очистка стічних вод гальванічних виробництв на більшості вітчизняних підприємствах здійснюється традиційними реагентними методами [1-3]. Однак, основними їх недоліками є не лише підвищені витрати реагентів на очистку, але і низький ступінь очистки від іонів важких металів. Крім того, об'ємні осади реагентної очистки стічних вод хімічно нестійкі і погано зневоднюються, що суттєво ускладнює та здорожує їх подальшу утилізацію. Тому виникає необхідність більш глибокої переробки промислових стоків із застосуванням ефективних технологій.

Одним із таких методів є феритизація цих стічних вод, що дозволяє отримати майже нерозчинні сполуки нікелю та інших важких металів, в результаті обробки їх іонів лужним реагентом та киснем повітря. Ця технологія забезпечує високий ступінь очищення стічних вод від сполук важких металів [4-5]. Проте в процесі очистки стічних вод, окрім сформованих феритних осадів також утворюються рідкі відходи з підвищеним вмістом розчинних солей. Отримані тверді та рідкі відходи вимагають подальшої екологічно безпечної утилізації наприклад у виробництві матеріалів різного призначення, а в разі неможливості виготовлення товарної продукції – в захороненні на відкритих звалищах.

Одним з перспективних шляхів комплексної утилізації продуктів очистки промислових стічних вод є їх використання: рідких – як затворювача цементів, а твердо фазових – як наповнювача лужних цементів, які розроблені науковою школою НДІВМ КНУБА ім. В.Д. Глуховського. Ці матеріали мають унікальні експлуатаційні властивості та можуть містити у своєму складі до 95% відходів та супутніх продуктів промисловості (паливних зол, доменних гранульованих шлаків, тощо) [6-8]. Утворені лужні цементи дають можливість надійно фіксувати у своїй структурі елементи радіоактивних та важких металів не тільки на фізичному, але й на хімічному рівні [9].

Виходячи з цього, метою цієї роботи є проведення експериментальних досліджень з утилізації рідких та твердих відходів феритизаційної очистки промислових вод у лужних цементах та вивчення їх хімічної стійкості цих матеріалів.

**Методика експерименту.** Нами досліджувалися рідкі та тверді відходи, які отримані в результаті переробки висококонцентрованих стічних вод методом феритизації. Результати хімічного аналізу цієї води методом атомно абсорбційної спектроскопії [10] наведено у табл. 1. Отриманий осад водоочистки подрібнювався до фракції 0,5...1 мм. Якісний і кількісний фазового складу ферит шламу, отриманий методом порошкової рентгенівської дифракції [11] зображено на рис. 1.

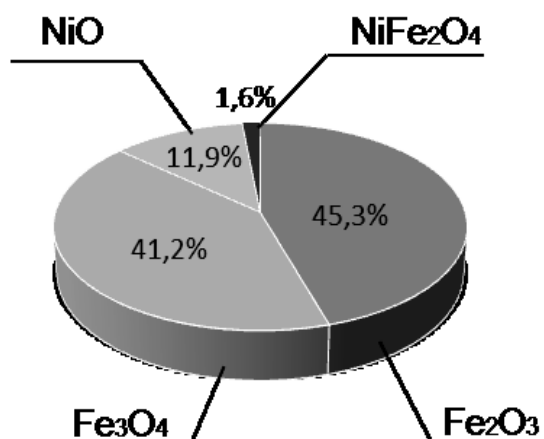


Рис. 1. Якісний і кількісний фазовий склад феритного осаду

Таблиця 1

**Склад основних компонентів обробленої води методом феритизації**

№ п/п	Найменування показника	Значення показника
1	Сульфати ( $SO_4^{2-}$ ), мг/дм <sup>3</sup>	25500
2	Хлориди ( $Cl^-$ ), мг/дм <sup>3</sup>	1186
3	Іони важких металів, мг/дм <sup>3</sup> : - залізо ( $Fe^{заг.}$ ) - нікель ( $Ni^{2+}$ )	0,10 0,42
4	pH	10,21

Для приготування лужного цементу на основі кальцій алюмосилікатного компоненту використовували мелений доменний гранульований шлак виробництва ПАТ «Завод ім. Ілліча» (м. Маріуполь), розмелений до питомої поверхні 450 м<sup>2</sup>/кг за приладом Блейна, та золу сухого відбору Ладжинської ТЕС, розмелену до питомої поверхні 800 м<sup>2</sup>/кг за Блейном. Як лужний компонент використовували соду кальциновану виробництва ПАТ «Кримсода».

Властивості цементу визначали у відповідності до ДСТУ Б В.2.7-181:2009 «Цементи лужні. Технічні умови» на зразках-балочках цементно-піщаного розчину розміром 4x4x16 мм.

Для вилуговування іонів важких металів із лужних цементів формували циліндри висотою та діаметром 4 x 3,5 см. Зразки цементу вилуговувались в дистильованій воді при температурі 25 °С протягом 28 діб в статичному режимі.

**Результати та їх обговорення.** Нами було проведено експерименти з використанням обробленої методом феритизації води та осаду на властивості двох видів лужного цементу: шлаколужного та лужного композиційного (гібридного). Для порівняння використовували лужні цементы, які затворені технічною водою. Склад цементів, їх технологічні та експлуатаційні властивості наведено у табл. 2. Аналіз отриманих результатів засвідчив, що введення до складу лужних цементів продуктів очистки промислових стічних вод суттєво не погіршує експлуатаційні властивості матеріалу. Незначне зниження міцності спостерігається при затворені цементу розчином очищеної стічної води (як для шлаколужного, так і для лужного композиційного цементу). Крім того, при спільному використанні цієї води, як затворювача та феритного осаду, як наповнювача відбувається стабілізація міцності матеріалу на рівні стандартних зразків. В загальному випадку відхилення міцності модифікованих цементів від аналогів порівняння (табл.2) не перевищує 5...10%.

Таблиця 2

**Склад та властивості лужних цементів з використанням відходів феритної очистки промислових стічних вод**

№ складу	Склад цементу, %					В/Ц розплив	Міцність при стиску, МПа, після, діб		
	Шлак	Зола	Лужний компонент	Затворювач	Феритний осад		3	7	28
1	66,7	28,6	4,7	технічна вода	-	0,4	23,12	30,62	38,81
2	66,7	28,6		оброблена вода	-		21,25	26,31	35,31
3	65,0	27,8			2,5		20,62	26,93	36,31
4	63,3	27,0			5,0		20,0	26,43	35,31
5	61,5	26,3			7,5		20,0	26,18	36,37
6	95,3	-			технічна вода		-	28,12	35,62
7	95,3	-		оброблена вода	-		27,50	21,37	24,06
8	92,8	-			2,5		25,62	31,68	41,25
9	90,3	-			5,0		23,75	29,5	39,31
10	87,8	-			7,5		23,12	32,56	43,18

На рис 2 і 3 наведені експериментальні дані з вилуговування важких металів із зразків цементів, які були отримані з використанням відходів очистки промислових стічних вод. Як показує аналіз отриманих результатів,

величина вилуговування іонів нікелю і заліза, в першу чергу, залежить від технічних параметрів та способу активації процесу очистки стічних вод, а також від вмісту феритного осаду у складі будівельного матеріалу. Результати вилуговування іонів нікелю та заліза з досліджуваних матеріалів показали надійну фіксацію таких компонентів у структурі матеріалу гібридних лужних цементів. Як видно з отриманих даних, що інтенсивне вилуговування іонів важких металів відбувається в перші 7 діб, а далі процес стабілізується. Крім того, аналіз даних рис. 2 і 3, свідчить про те, що для більшості досліджених композицій концентрації іонів важких металів внаслідок їх вилуговування відповідають вимогам СанПиН 2.1.4.1074-01 (ГДК заліза становить  $0,3 \text{ мг/дм}^3$ , а для нікелю –  $0,1 \text{ мг/дм}^3$ ). Тільки у випадку проведення процесу феритизації з низькотемпературною активацією концентрації важких металів внаслідок їх вилуговування перевищують вказані вимоги Стандарту. Для решти складів показники вилуговування знаходяться в межах вимог. Крім того, слід зазначити, що в деяких зразках вилуговування іонів важких металів практично відсутнє (криві на рис. 2б, в і 3в). Це можна пояснити тим, що залишкові концентрації іонів важких металів знаходяться нижче допустимого діапазону вимірювання приладу. Відмічено, що здатність до вилуговування іонів важких металів з відходів водоочистки зростає в ряду «електромагнітна імпульсна активація» – «термічна активація» – «низькотемпературна активація». На нашу думку це пов'язано із зниженням у цій послідовності кількості кристалічних феритних фаз в отриманих зразках осаду.

Варто відзначити, що для лужних цементів, які затворювалися водою після процесу феритизації і без введення в їх склад феритного осаду, не відмічено вилуговування іонів важких металів. Це свідчить про їх надійну фіксацію у структурі цементу.

**Висновки.** В результаті проведених робіт показано принципову можливість створення ефективних екологічно чистих будівельних матеріалів на основі лужних цементів з використанням продуктів очищення промислових стічних вод. Встановлено, що при застосуванні рідких відходів феритної очистки води, як затворювача лужних цементів, а також при заміні частини шлаколужного або гібридного цементу на феритний осад суттєво не знижуються експлуатаційні показники цих матеріалів. Всі отримані нами зразки цементів відносяться до марки М400. Результати вилуговування іонів нікелю та заліза з цих будівельних матеріалів показали надійну фіксацію важких металів у структурі лужних цементів. Матеріали на основі цих цементів рекомендуються для використання в будівництві нежитлових будівель і споруд.



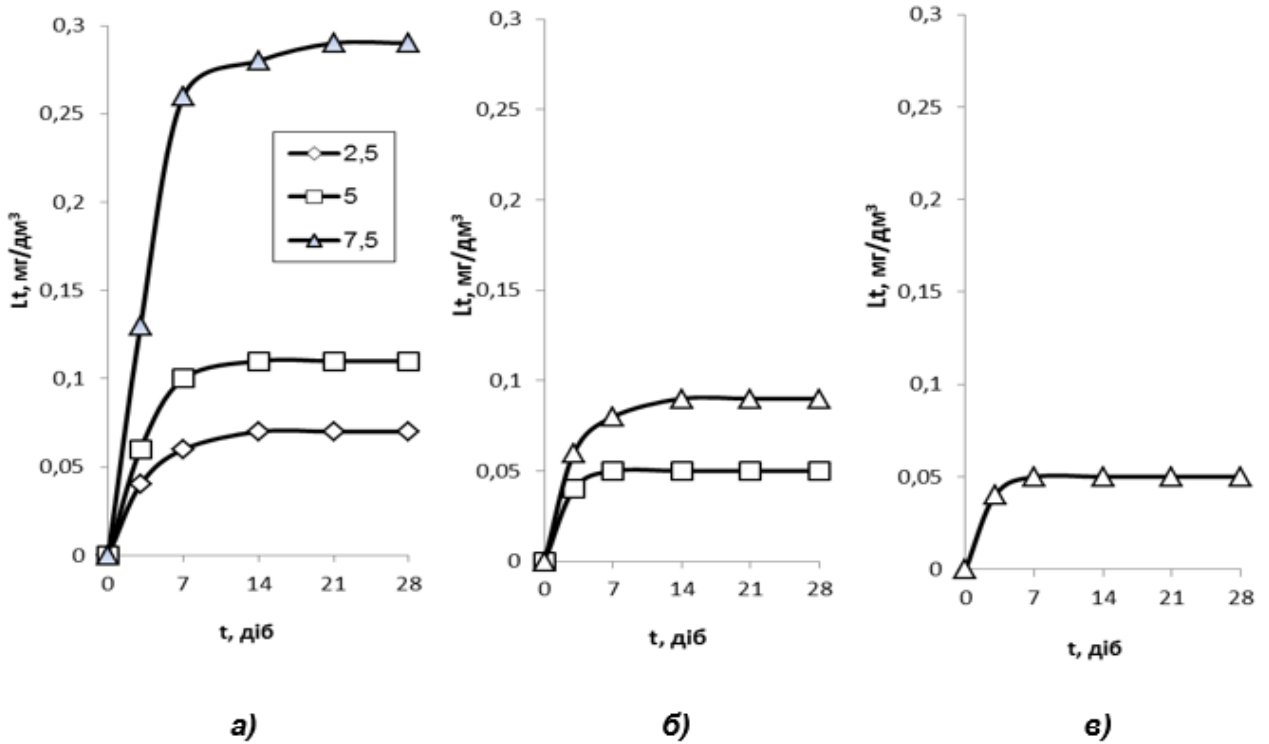


Рис. 2. Кінетика вилугування іонів нікелю з матриці гібридного лужного цементу:  $\diamond$ ,  $\Delta$ ,  $\square$  – вміст феритного шламу, %; активація процесу: а – низькотемпературна активація; б – термічна; в - електромагнітна імпульсна

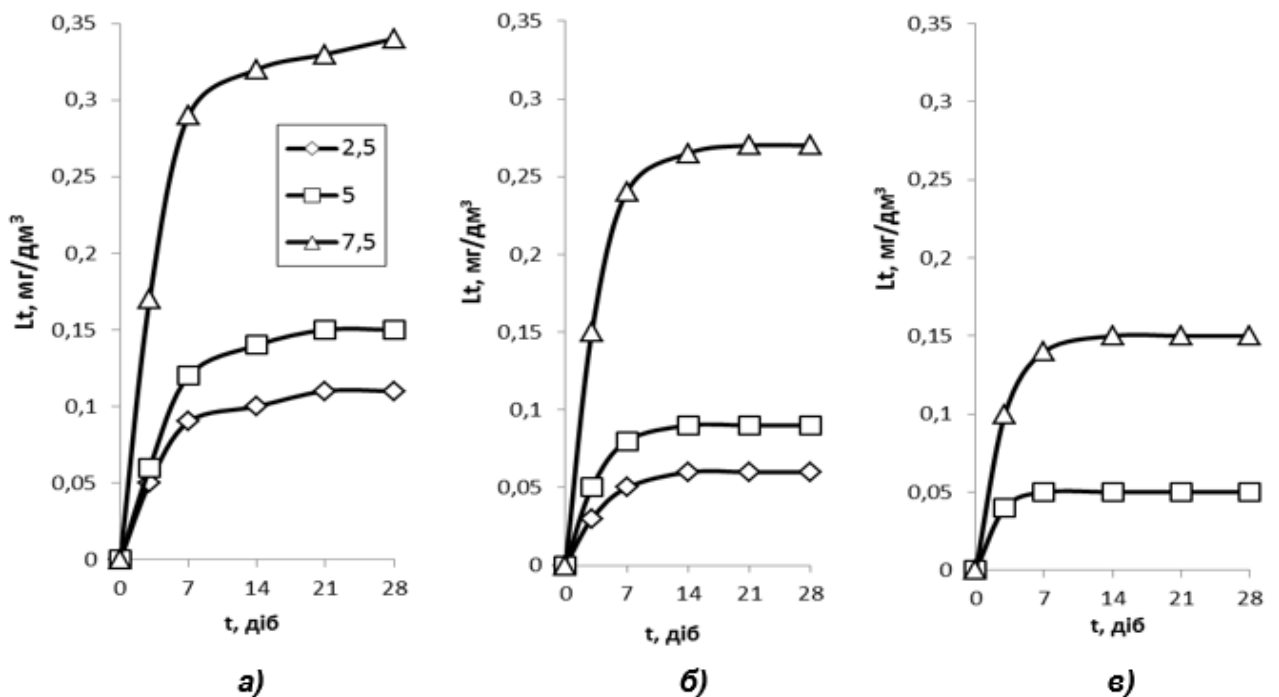


Рис. 3. Кінетика вилугування іонів заліза з матриці гібридного лужного цементу:  $\diamond$ ,  $\Delta$ ,  $\square$  – вміст феритного шламу, %; активація процесу: а – низькотемпературна активація; б – термічна; в – електромагнітна імпульсна

## Список літератури

1. *Доллина Л.Ф.* Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов: Монография. Дн-вск.: Континент, 2008. 254 с.
2. *Kochetov G., Zorya D., Grinenko J.* (2010). Integrated treatment of rising cooper-containing wastewater. Civil and Environmental Engineering. Vol.1, n. 4. pp. 301-305.
3. *Goldmann A.* (2006). Modern ferrite technology Springer, Pittsburg, USA, 445.
4. *Кочетов Г.М., Науменко І.В., Самченко Д.М.* Феритизаційна переробка відпрацьованих технологічних розчинів, що містять сполуки цинку та нікелю // Проблеми водопостачання та гідраліки: Наук.-техн. Зб. 2014р. Вип. 24. С. 59-66.
5. *Кочетов Г.М., Самченко Д.М.* Удосконалення феритизаційної технології переробки стічних вод: електромагнітна імпульсна активація процесу // Водопостачання та водовідведення. Вип. 3, 2015. С. 20-26.
6. *Кривенко П.В., Ковальчук О.Ю.* Гібридні лужні цементи: структура та властивості // Вісник ДНАБА. Сучасні будівельні матеріали. Випуск 1 (105). 2015. С. 59-63.
7. *Kovalchuk O.Yu., Drochitka R., Krivenko P.V.* Mix design of high volume alkali activated cement // Advanced Materials Research, Vol 1100, pp. 36-43.
8. *Krivenko P., Cao H., Weng L., Petropavlovskii O., Kovalchuk O.Yu.* Special hybrid alkali activated cements for immobilization of salt concentrates of low-level radioactive wastes // Proceed. 19th Internat. Conf. "Ibausil". Weimar (Germany). 2015. P. 1-0820 – 1-0827.
9. *Krivenko P., Petropavlovsky O., Gelevera A., Jukov N.*: Immobilizing properties of alkaline cementitious systems. 2<sup>nd</sup> International Symposium NON-TRADITIONAL CEMENT & CONCRETE, ISBN 80-214-2853-8, Brno, 2005, P. 613-626.
10. *Пупышев А. А.* Атомно-абсорбционный спектральный анализ. М.: Техносфера, 2009. 784 с.
11. *Бокий Г.Б., Порай-Кошиц М.А.* Рентгеноструктурный анализ. М.: МГУ, 1964. Т. 1. 490 с.

*Стаття надійшла до редакції 30.11.17*

Ю.Д. КОПАНИЦЯ, кандидат технічних наук  
Київський національний університет будівництва і архітектури

## **АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ НА ПОВЕРХНЮ ДОВІЛЬНОЇ ФОРМИ ЗА СТАНДАРТНИМИ ФОРМУЛАМИ І МЕТОДОМ ТРЬОХ КОМАНД K123**

*Проведено порівняльний аналіз використання універсального авторського метода K123 і класичної методики розрахунку тиску в системі комп'ютерної алгебри CAS MAXIMA.*

**Ключові слова:** сила тиску; епюра; центр ваги; метод K123; інтеграл.

*Проведено сравнительный анализ использования универсального авторского метода K123 и классической методики расчёта давления в системе компьютерной алгебры CAS MAXIMA.*

**Ключевые слова:** сила давления; епюра; центр тяжести; метод K123; интеграл.

*The comparative analysis of the use of the Universal Author's method K123 and classical technique for pressure calculation in CAS MAXIMA has been carried out.*

**Key words:** pressure force; pressure diagram; center of pressure; method K123; integral.

Проведено порівняльний аналіз використання універсального авторського метода K123 [1-4] й стандартного алгоритму розрахунку рівнодійної сили тиску на криволінійну поверхню на прикладі задачі, яку наведено в підручнику [5] в якості зразка. Підручник затверджено Міністерством освіти і науки України у 2002 році.

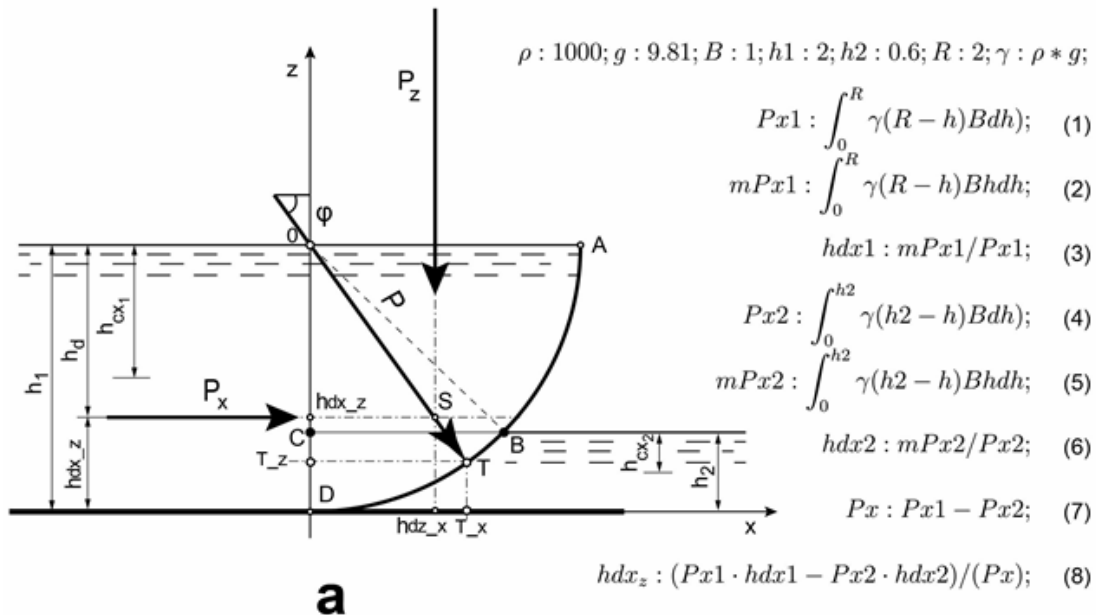
Умова задачі (рис.1,а) включає діаметр циліндричного затвору, рівні води й стандартне завдання – визначити величину й напрям дії рівнодійної сили тиску на метр ширини означеної поверхні. Формули стандартного алгоритму наведено на рисунку (рис.1,б).

Запропонований у підручнику типовий приклад розрахунку включає стандартні пункти: розрахунок ортогональних проекцій вектору сили, визначення модуля рівнодійної сили й кут напрямку дії. Рисунок із геометричним зображенням вектору рівнодійної сили тиску (далі РСТ) є стандартним й тому в статті не приведено [1, рис. 1.26].

Тестову задачу паралельно розраховано за авторським методом трьох команд K123 в системі комп'ютерної математики CAS MAXIMA [8-10]. Повний

алгоритм (послідовність 15-ти формул й одну систему алгебраїчних рівнянь) наведено на рисунку 1,с.

Універсальний інтегральний метод трьох команд K123  
комп'ютерного розрахунку рівнодійної сили гідростатичного тиску  
на поверхню довільної форми



**a**

Стандартний алгоритм розрахунку  
рівнодійної сили гідростатичного  
тиску на один метр затвора

$$Px1 : \rho \cdot g \cdot hx1 \cdot w1; \quad (1)$$

$$Px2 : \rho \cdot g \cdot hx2 \cdot w2; \quad (2)$$

$$Pz : \rho \cdot g \cdot W; \quad (3)$$

$$P : \sqrt{Px^2 + Pz^2}; \quad (4)$$

$$tg(\varphi) : Pz/Px; \quad (5)$$

$$fb(h) := \sqrt{(R^2 - (R-h)^2)}; \quad (9)$$

$$Pz : \int_{h2}^R (fb(h)\gamma)Bdh; \quad (10)$$

$$mPz : \int_{h2}^R fb(h)\gamma B(fb(h)/2)dh; \quad (11)$$

$$hdxz : mPz/Pz; \quad (12)$$

$$P : \sqrt{(Px^2 + Pz^2)}; \quad (13)$$

$$fi : (180/\pi \cdot arctg(Pz/Px)); \quad (14)$$

$$\begin{cases} z = -\frac{Pz}{Px} \\ z = -\sqrt{4-x^2} \end{cases} \quad (15)$$

**c**

**b**

Рис. 1.Стандартний та універсальний K123 методи  
визначення рівнодійної сили гідростатичного тиску  
а - умова задачі; б - стандартний алгоритм; с - метод K123

Розрахунок за методом K123 дозволяє визначити:

- модулі ортогональних проєкцій рівнодійної сили тиску (далі РСТ);
- модуль РСТ;

- відповідні ортогональні координати центрів ваги тривимірних (далі 3D) вертикальної й горизонтальної проєкцій чотирьох вимірної (далі 34) епюри тиску;
- розрахунок кута напряду дії РСТ;
- координати відповідних ортогональних проєкцій центрів ваги 3D епюр й кут напряду дії РСТ визначають аналітично визначене рівняння напряду;
- система рівнянь криволінійної напрядної поверхні й рівняння напряду дозволяють знайти останній – третій параметр векторної величини РСТ.

У такий спосіб нами визначено всі три параметри векторної величини РСТ. В порівнянні із стандартним алгоритмом метод К123 дозволяє визначати координати центрів ваги ортогональних проєкцій 3D епюр відносно початку координат. Методом К123 ми маємо можливість визначати координати відносно будь-якої довільної точки, яка лежить на лінії дії РСТ. Інші особливості універсального авторського методу трьох команд К123 ми наведемо після аналізу типів задач, що наводяться в сучасних підручниках [5,6].

Всі учбові задачі в підручниках й посібниках гідравліки із розділу «Гідростатика. Визначення гідростатичного тиску на плоску поверхню» з 1960-х по 2017-й роки укладаються в наступну умовну схему класифікації:

- за геометричною формою змоченої поверхні [рис. 2, a-f];
- за рівнем вільної поверхні рідини відносно верхньої кромки означеної поверхні – прошарок рідини, вакууметричний або манометричний тиски.

Вся варіативність учбових задач обмежено стандартними формами змоченої поверхні (рис. 2, a-f): квадрат або прямокутник (рис. 2, a), трикутна поверхня й трапеція (рис. 2, b, c), коло (рис. 2, d-e), парабола (рис. 2, f). Всі фігури обов'язково симетричні відносно вертикальної осі.

Рівень вільної поверхні рідини для поверхні у вигляді кола обов'язково тільки на рівні центру (рис. 2, d) або не нижче (рис. 2, e) лінії верхньої кромки.

Інші умови задачі: наявність атмосферного, вакууметричного, манометричного тисків; наявність прошарку рідини над розглядаємо поверхнею – створюють варіації в учбових завданнях. Але форма змоченої поверхні залишається незмінною (рис. 2, a-f).

Для вирішення означених варіантів учбових завдань, в якості прикладу, у посібнику [6] наведено чотири десятка стандартних формул: центр ваги, площа, момент інерції. Кожна формула використовується для конкретного варіанта задачі.

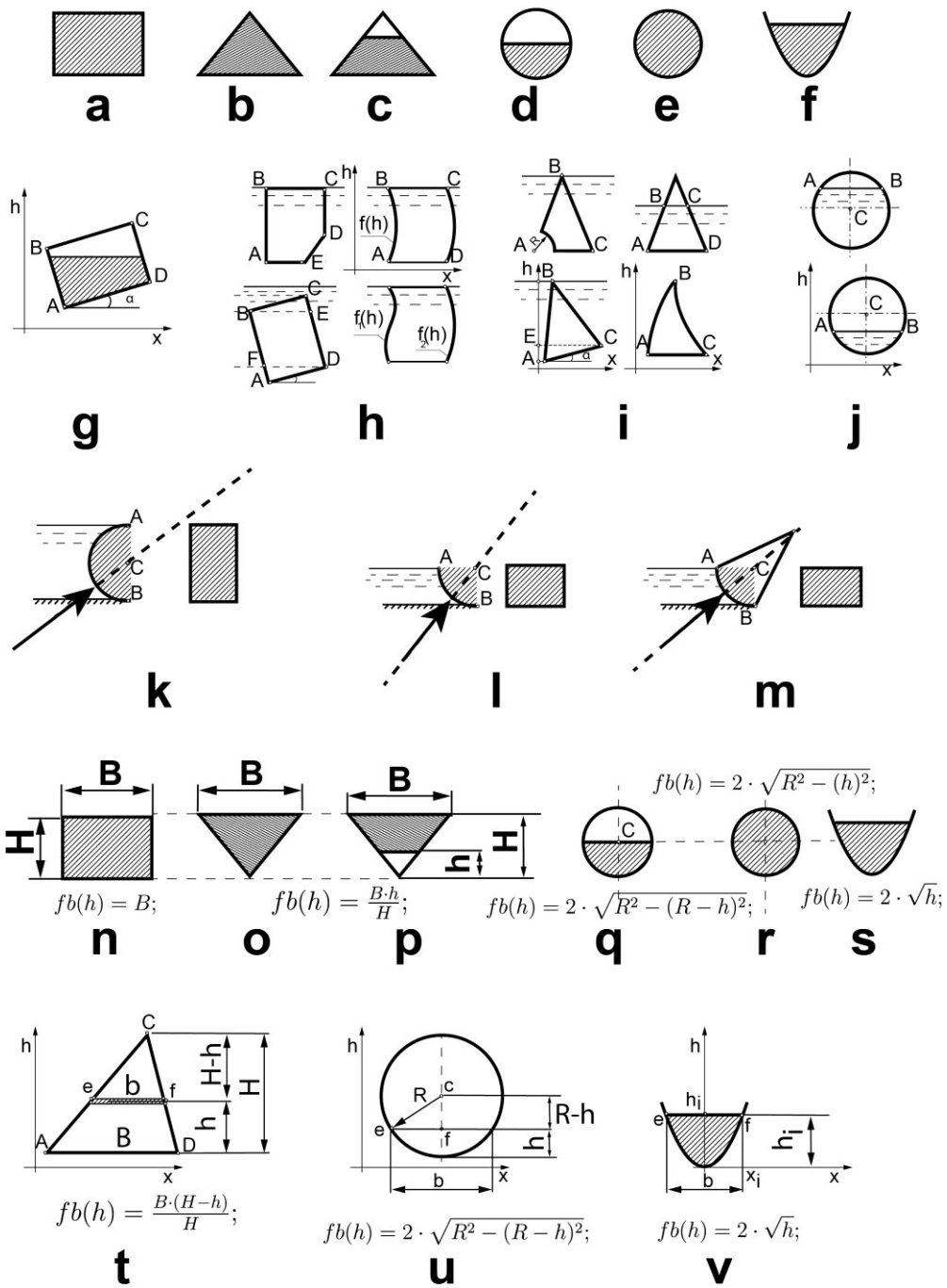


Рис. 2.Варіанти поверхні довільної форми в задачах гідравліки

В реальних умовах при проектуванні або експлуатації об'єктів водопостачання та водовідведення ми маємо справу із «нестандартними» плоскими кришками, боковими стінками, елементами конструкції або засувками на які діє гідростатичний тиск. Не всі реальні плоскі поверхні: мають абсолютну симетрію відносно вертикальної осі (рис 2.g); правильну геометричну форму (рис 2.h-i); рівень води відхиляється відносно центру кришки (рис 2.j) , яка прикриває круглий патрубок, трубу (або бокова стінка

бака) тощо. В інженерній й науковій практиці варіантів може бути набагато більше.

Всі «нестандартні» варіанти (рис 2,*g-j*) не можуть бути розраховані за стандартною методикою – нема готових формул. В підручниках не приведено алгоритмів розрахунку «нестандартних» задач.

Слово «нестандартні» взято у дужки тому, що саме ці задачі є самими реальними. А свідомо обмежений набір умовних учбових задач просіяно через сито вищеозначеного набору відомих формул [2]. Останні сімдесят років триває процес штучного відбору – стандартна формула підходить для розрахунку задачі й задача включається до посібника або підручника.

Традиція вилучення цікавих інженерних задач із посібників гідравліки з'явилась після 30-х років ХХ століття.

В стандартних підручниках представлено тільки три набори криволінійної поверхні – півкола (рис 2,*k*), чверть кола (рис 2,*l*), сектор (рис 2,*m*). Як правило розрахунок задано проводити на метр ширини затвора. Останнє означає, що вертикальна проекція криволінійної поверхні обов'язково має форму прямокутника. Спеціальне спрощення умови задач виключає необхідність проводити повний розрахунок із визначенням координат центрів ваги епюри й тіла тиску.

В реальних умовах поперечний перерізи каналів або лотків має форму трапеції (рис 2,*p*), кола (рис 2,*q-r*), параболічну форму (рис 2,*s*), або їх композицію. За такими умовами ні в одному підручнику ми не зустрінемо учбових задач. Причина проста – зазвичай приведені в підручниках готові формули діють тільки для одного типу задач – напрямна криволінійної поверхні обмежена формою півкола, чверть кола, або сектор (рис 2,*k-m*). Для всіх задач вертикальна проекція прямокутник (рис 2,*n*). Що робити й які алгоритми використовувати майбутньому інженеру в розрахунках реальних споруд із поперечним перерізом не тільки прямокутник(рис 2,*o-s*)?

Метод трьох команд K123 дозволяє за єдиним правилом запису універсальної формули визначити величини вертикальної й горизонтальної проекції сили гідростатичного тиску на поверхню будь-якої форми. У такий спосіб – за єдиним алгоритмом – визначається глибина занурення центру тиску, або координати останнього відносно будь-якого ортогонального напрямку. Будь-яка реальна задача для поверхні довільної форми вирішується за єдиним універсальним алгоритмом для плоскої або криволінійної поверхні.

Реалізація методу K123 дозволяє проводити аналітичні або (в складних випадках) чисельні розрахунки векторної величини РСТ за повним алгоритмом визначення всіх трьох параметрів: величина, напрям дії й координати центру тиску (далі КЦТ).

На рисунку представлено результати визначення сили тиску на циліндричну поверхню: проекції на осі, величину самої сили, кут напрямку дії й координати перетину центрів ваги вертикальної й горизонтальної епюр

означеної сили. Метод трьох команд K123 дозволяє аналітично або за чисельним алгоритмом визначати: об'єм епюри горизонтальної проекції сили тиску й координату проекції її центру ваги на ортогональний напрям відносно довільної точки (яка лежить на лінії дії сили). На рисунку представлений варіант визначення далі КЦТ.

Саме наявність одної універсальної форми запису розрахункової формули суттєво відрізняє універсальний метод трьох команд K123 від жорстко запрограмованого стандартного алгоритму визначення сили тиску, які приводяться в сучасних підручниках.

Наприклад, для представлених на рисунку стандартних типів поверхні – прямокутник, трикутник, парабола й коло – в посібнику приведено 40 допоміжних формул. Кожна формула використовується для одного особистого випадку.

Будь яка зміна стандартних умов задачі (рис.2,g-f) робить ці спеціалізовані формули неробочими. При зміні рівня води відносно центру для кола (рис.2,j), криволінійні бокові грані (рис.2,h-i), проста відсутність симетрії відносно вертикальної осі за рахунок повороту відносно вертикалі (рис.2,g), асиметрія фігури (рис.2,h-i) тощо призводить до того, що виключається сама можливість скористатись стандартними алгоритмами. Причина – відсутність готових стандартних формул в стандартному загальноприйнятому алгоритмі.

В підручнику приведено зразковий приклад розрахунку тиску на затвор. Повний розрахунок за методом K123 – із визначенням КЦТ – показав, що вектор рівнодійної сили тиску проходить через центр. Для об'єктивного висновку доцільно порівняти рисунок підручника [1,.35] й результати комп'ютерного розрахунку за методом K123 (рис.1,a).

Повний комп'ютерний розрахунок задачі за методом трьох команд K123 дозволив отримати додатково координати центрів ваги тіла тиску й епюри. Побудований в масштабі рисунок відрізняється від схематичного зображення у підручнику – інше положення горизонтальної проекції сили тиску, не точно показано глибину занурення центру ваги епюри й відповідне положення горизонтальної проекції сили тиску. Дійсно, кут напрямку дії рівнодійної сили гідростатичного тиску проходить через центр кола. Але, використовуючи координати центрів ваги й продовження їх проекцій на відповідні ортогональні напрями ми отримали точку їх перетину. Вектор рівнодійної сили тиску проходить через цей перетин й проектується на поверхню. Реальне положення вектору на рисунку суттєво відрізняється від дуже умовної схеми у підручнику.

Причина такого неточного й дуже умовного схематичного рисунку в підручнику, можливо полягає в тому, що автори не проводять точний інженерний розрахунок у повному обсязі. Не визначають обов'язковий третій параметр вектору – дуже важливий на практиці – координати точки прикладання рівнодійної сили тиску.



Зазвичай аналогічні умови задач зустрічаються в задачниках, но пропонують тільки визначити величину й напрям дії сили тиску. Ні в одному навчальному посібнику не приділяється увага повному розрахунку із визначенням всіх трьох параметрів векторної величини: модуль, напрям дії й координати точки тиску. А саме в практичній діяльності необхідні координати точки на яку проектується вектор рівнодійної сили тиску, який проходить через перетин ортогональних проекцій центрів ваги епюри й тіла тиску або ортогональних проекцій центрів ваги вертикальної й горизонтальної епюр.

Відповідь на всі ці запитання дуже проста – за останні 90 років із задачників вилучені всі задачі із елементами «обчислення нескінченно малих». Приклади складання рівняння в диференціалах й подальше інтегрування взагалі не розглядаються після 1927 року [7]. Ми маємо дуже обмежений набір умовних учбових задач. Існуючи приклади алгоритмів розрахунку сили гідростатичного тиску на плоску й криволінійну поверхні не відповідають ні сучасному рівню розвитку програмного забезпечення, ні вибуховому розвитку персональних мікропроцесорних гаджетів (планшети, смартфони).

Ще один приклад спрощеного підходу до розрахунку учбових задач у навчальному підручнику [6]. Представлена на рис. 3 стандартна задача визначення тиску на циліндричну поверхню. Для порівняння аналогічний рисунок для цієї задачі представлено в навчальному посібнику [6]. Центри ваги показано умовно й не використовуються для визначення координати центра тиску. Розрахунок координат центрів ваги епюри й тіла тиску не приводиться.

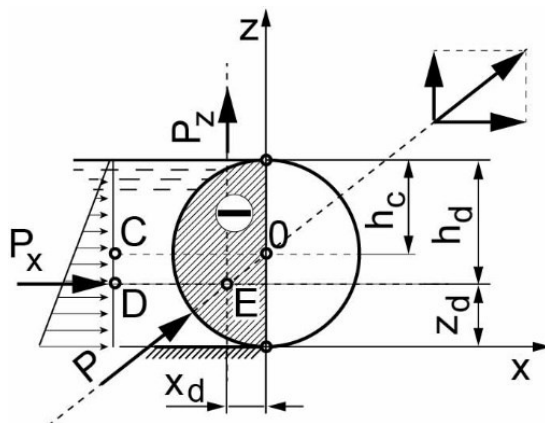


Рис.3. Результат розрахунку стандартної задачі методом трьох команд K123. Визначення координат “ $x_d$ ”, “ $z_d$ ” – проекції центру ваги епюри й тіла тиску на ортогональні напрями

На відміну від стандартного алгоритму, розрахунок задачі проведено у повному обсязі методом трьох команд K123. Додатково визначено координати “ $x_d$ ”, “ $z_d$ ”. В стандартних учбових прикладах обмежуються тільки визначенням сили тиску й її напрямом. Аргумент – недоцільно ускладнювати учбові розрахунки. Умови всіх учбових задач підібрані так, що напрям дії сили тиску обов’язково буде проходить через центр кола. Рішення задачі

закінчується умовним зображенням вектору рівнодійної сили тиску під розрахованим кутом проведеним через центр кола.

Смартфони із сучасними операційними системами, із портованими пакетами систем комп'ютерної алгебри, із виходом в Інтернет й доступом до необмежених об'ємів інформації, доступом до хмарових сервісів із *WEB*-інтерфейсами *CAS MAXIMA* [8-10], *MAPLE*, *MATHEMATICA*, *MathCAD*, *MathLab*, *Derive*, *Octave*, *R* [10] дозволяють проводити наукові й інженерні розрахунки будь-якої складності. Програми *R*, *CAS MAXIMA* належать до відкритого програмного забезпечення. В навчальному процесі доцільно використовувати саме безкоштовне відкрите програмне забезпечення. В європейських країнах держустанови використовують виключно відкрите програмне забезпечення.

Ми не готуємо майбутніх інженерів до розрахунку реальних задач. Не вирішується задача розробки теоретичних основ й реалізації нових сучасних алгоритмів й прикладів розрахунку нестандартних задач. Всі учбові розрахунки останні 90 років орієнтовано на використання дуже обмеженої кількості стандартних формул. Відсутня систематична практика використання апарата «обчислення нескінченно малих» в аналітичних й чисельних розрахунках індивідуальних завдань широкого кола інженерних дисциплін. Майже відсутня культура використання систем комп'ютерної математики в розрахунках учбових задач.

В учбовому процесі за браком часу й скороченням учбових годин не приділяється увага звичайним правилам комп'ютерного розрахунку – обов'язковий розрахунок да двома альтернативними алгоритмами, або аналітичні й чисельні розрахунки одної задачі, розробка й розрахунок обов'язкового тестового прикладу для перевірки результатів, оцінки точності в ітераційних розрахунках тощо. За такими умовами сучасна інженерна освіта не в повній мірі відповідає вимогам й задачам які стоять перед молодими фахівцями у XXI-му столітті.

Автор розробив прототип авторського учбового сайту [www.k123.com.ua](http://www.k123.com.ua) Копаниця Ю.Д. © [11] для впровадження інноваційних технологій в учбовий процес. На прикладі курсів «Технічна механіка рідини і газів», «Спецпитання гідравліки», «Масопередача», «Метрологія, стандартизація, сертифікація», «Сертифікація наукової продукції» відпрацьовується технологія розміщення в он-лайні учбових матеріалів, он-лайн розрахунків, прикладів типових задач, елементів програмного коду для виконання індивідуальних завдань. Окремі зразки індивідуальних робіт з дозволу студентів розміщено на сайті. Студенти знайомляться із основами публікації даних в мережі Інтернет й оформляють роботи із використанням стандартів *HTML 5*, *CSS 3.0*. Завдання по курсу «Сертифікація наукової продукції» приймаються в електронному форматі у вигляді файлів *HTML*.

З метою поліпшення якості електронних учбових матеріалів проводиться анкетування й опитування студентів. До сайту підключено сервіс *Google Analytics*, що дозволяє досліджувати процес використання матеріалів учбового сайту. На сайті діють три універсальні он-лайн форми розрахунку

двох задач гідростатики (плоска й криволінійна поверхня) й розрахунок задачі розділу гідродинаміка – «Рівняння Д. Бернуллі для в'язкої рідини».

### Висновки

Відкриття границь із Європейськими державами ставить питання відповідності Евростандартам якості національної освітньої програми. В вирішенні означеної задачі можна виділити два аспекти – інноваційні технології й реклама досягнень в мережі Інтернет. У такий спосіб ми маємо шанс виграти час у боротьбі за нашу молодь й майбутнє національної освіти. На думку автора ми маємо вирішувати задачі:

– впровадження сучасних інноваційних технологій в учбовий процес – розробка теоретичних основ для нових універсальних алгоритмів розрахунку інженерних задач, що сприяє розвитку культури комп'ютерних розрахунків в технічних дисциплінах;

– представництво всіх елементів учбового процесу в мережі Інтернет – розробка онлайн-ових учбових курсів (відео лекцій, вебінарів, інтерактивних учбових матеріалів, тестів, он-лайн розрахунків учбових задач й типових прикладів тощо).

### Список літератури

1. *Копаниця Ю.Д.* Комп'ютерний розрахунок сили тиску. Універсальний алгоритм трьох команд – K123. // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА. Вип.18. 2012. С.148–163.

2. *Копаниця Ю.Д.* Розрахунок гідростатичного тиску на криволінійну поверхню. Універсальний алгоритм трьох команд – K123. // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА. Вип.20. 2012. С.105–119.

3. *Копаниця Ю.Д.* Аналіз виміру епюри гідростатичного тиску на криволінійну поверхню. Універсальний метод розрахунку K123. // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА. Вип.21. 2013. С.165–180.

4. *Копаниця Ю.Д.* Інтегральні рівняння універсального методу трьох команд K123 // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА. Вип.22. 2013. С.159–171.

5. *Константинов Ю.М.* Технічна механіка рідини і газу: Підручник / Ю.М. Константинов, О.О.Гіжа. К: Вища шк., 2002. 277 с.

6. *Константинов Ю.М.* Гідростатика. Приклади і задачі: навчальний посібник / Ю.М. Константинов, О.О.Гіжа, Ю.Д.Копаниця. К: КНУБА, 2012. 112 с.

7. *Горчин Н.К.* Гидравлика в задачах / Н.К. Горчин, М.Д. Чертоусов. Л: Кубуч, 1927. 430 с.

8. [http://ru.wikipedia.org/wiki/GNU\\_General\\_Public\\_License](http://ru.wikipedia.org/wiki/GNU_General_Public_License)

9. <http://maxima.sourceforge.net/>

10. <http://maxima-online.org/>

11. *Копаниця Ю.Д.* <http://www.k123.com.ua> ©

Стаття надійшла до редакції 29.11.17

С.І. КРІЛЬ, доктор технічних наук  
І.В. СКОРОХОД, кандидат фізико-математичних наук  
В.В. ФАДЕЙЧЕВ, головний інженер-гідротехнік  
Інститут гідромеханіки НАН України

## ЕНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ЕРЛІФТА

*Запропоновано новий підхід до вивчення загальних закономірностей висхідної течії суміші рідини і повітряних бульбашок у вертикальній трубі, в основу якого покладено гідравлічні рівняння нерозривності і енергобаланса для стаціонарного двофазного ізотермічного потоку. Побудовано енергетичну модель ерліфтних газорідинних течій з урахуванням втрат напорів на тертя і ковзання фаз. Наведено результати порівняння розрахункових витратних характеристик ерліфтів з експериментальними.*

**Ключові слова:** ерліфт, газорідинна течія, енергетична модель, втрати напорів на тертя і ковзання фаз, витратна характеристика ерліфта.

*Предложен новый подход к изучению общих закономерностей восходящего течения смеси жидкости и воздушных пузырей в вертикальной трубе, в основу которого положены гидравлические уравнения неразрывности и энергобаланса для стационарного двухфазного изотермического потока. Построена энергетическая модель эрлифтных газожидкостных течений с учетом потерь напора на трение и скольжение фаз. Приведены результаты сравнения расчетных расходных характеристик эрлифтов с экспериментальными.*

**Ключевые слова:** эрлифт, газожидкостное течение, энергетическая модель, потери напора на трение и скольжение фаз, расходная характеристика эрлифта.

*The new method of approach to the study of the general regularities of the upward flow of the mixture liquid and air bubbles in vertical pipe has been suggested in this paper. The hydraulic continuity equations and equations of energy balance for stationary isothermal two-phase flow were used as a base of this method. The energy model of airlift for gas-liquid flows, taking into account the pressure losses due to friction and slip phase. The results of a comparison of the calculated flow characteristics of the airlift with the experimental ones are given.*

**Keywords:** airlift, gas – liquid flow, energy models, pressure losses due to frictions and slip phase, flow rate characteristics of airlift.

Висхідний рух сумішей рідини і повітряних бульбашок у вертикальній піднімальній трубі ерліфтів носить складний характер. Такі потоки турбулентні і нерівномірні. Внаслідок пониження тиску уздовж потоку змінюються у тому ж напрямку не тільки об'єм і густина газової фази, а й структура і режим руху суміші та її гідравлічні характеристики. Із-за неперервного спливання бульбашок потік газорідинної гетерогенної суміші характеризується, як правило, ковзанням фаз, на що потрібно звернути особливу увагу при побудові математичної моделі такого роду двофазних потоків. Адже при обтіканні спливаючих бульбашок рідиною за їх кормою появлятимуться вихорові сліди або дрібномасштабні збурення, на утворення яких витратиметься потужність сили гідродинамічної взаємодії рідинної і газової фаз у відносному осередненому русі цих фаз. При цьому потужність цієї сили буде дорівнювати дисипативній потужності внутрішніх сил в'язкого тертя в області вихрової течії і, таким чином, виражатиме втрату частини механічної енергії газорідинного потоку на ковзання фаз.

Відомі у науковій літературі математичні моделі ерліфтних газорідинних течій будуються на основі диференціальних рівнянь збереження маси і імпульсу для одновимірного стаціонарного руху сумішей [1-5]. Однак, такі моделі не враховують потужність сили міжфазної взаємодії у відносному русі фаз, оскільки ця сила не міститься в рівнянні руху газорідинної суміші у цілому. Саме з цим, можливо, і пов'язані відомі труднощі при визначенні гідравлічного коефіцієнта тертя у вертикальних газорідинних потоках.

Нами запропоновано новий так званий енергетичний підхід до побудови математичної моделі ерліфтних газорідинних течій. В основу його покладено базові гідравлічні рівняння нерозривності фаз, рівняння енергобалансу для потоку газорідинної суміші в трубі (рівняння Бернуллі) та рівняння термодинамічного стану фаз.

Для стаціонарного ізотермічного руху реальної (в'язкої) газорідинної суміші у вертикальній піднімальній трубі ерліфта зазначені рівняння напишемо, враховуючи [6,10], у наступному вигляді:

рівняння нерозривності фаз:

$$\rho_r Q_r = const, \quad (1)$$

$$Q_w = const; \quad (2)$$

рівняння Бернуллі у формі напорів:

$$(1 - C_m) \frac{P_1 - P_2}{\rho_w g} + C_m \frac{P_{am}}{\rho_0 g} \ln \frac{P_1}{P_2} = H + \frac{1}{2g} [(1 - C_m)(u_{w,2}^2 - u_{w,1}^2) + C_m(u_{r,2}^2 - u_{r,1}^2)] + h_{тр} + h_{к}; \quad (3)$$

$$h_{\text{тп}} = \frac{4}{D} \int_0^H \frac{\tau_0}{\rho_P g} dz; \quad (4)$$

$$h_k = \frac{F}{g(Q_{m,r} + Q_{m,w})} \int_0^H R(u_r - u_w) dz; \quad (5)$$

рівняння стану газової і рідинної фаз при абсолютній температурі

$$T = \text{const.}$$

$$\frac{P}{\rho_r} = \text{const.}; \quad (6)$$

$$\rho_w = \text{const.} \quad (7)$$

При написанні рівнянь (1) – (7) використані наступні позначення:

$\rho_r, \rho_w$  – густина газової і рідинної фаз;  $\rho_0$  – густина вільного повітря при нормальних (технічних) умовах;  $Q_r, Q_w$  – об'ємна витрата газу і рідини;  $C_m$  – витратна масова концентрація газової фази;  $P$  – робочий абсолютний тиск у піднімальній трубі ерліфта;  $P_{\text{атм}}$  – атмосферний тиск при нормальних (технічних) умовах;  $u_w, u_r$  – середня у живому перерізі потоку істинна швидкість рідинної і газової фаз;  $h_{\text{тп}}, h_k$  – втрата п'езометричного напору на тертя і ковзання фаз по довжині піднімальної труби ерліфта;  $\tau_0$  – інтенсивність сили тертя на стінках труби;  $\rho_P$  – витратна густина газорідинної суміші;  $F, D, H$  – площа перерізу, діаметр і довжина піднімальної труби ерліфта;  $Q_{m,w}, Q_{m,r}$  – масова витрата рідинної і газової фаз;  $R$  – питома, віднесена до одиниці об'єму суміші, сила міжфазової гідродинамічної взаємодії, обумовлена ковзанням фаз;  $Z$  – координата, спрямована вверх, відлік якої починається від центра змішуючого пристрою ерліфта;  $g$  – прискорення вільного падіння; індексами 1 і 2 позначені величини у початковому і кінцевому живих перерізах газорідинного потоку у піднімальній трубі ерліфта.

Рівняння (1) – (7) є базовими рівняннями для побудови енергетичної математичної моделі ерліфтних течій, неперервною фазою яких являється рідина, а дискретною – бульбашки (снаряди) повітря.

Основна задача гідравлічного розрахунку ерліфтної установки полягає у визначенні її продуктивності, тобто об'ємної витрати рідини у піднімальній вертикальній трубі ерліфта залежно від подачі вільного повітря при нормальних (технічних) умовах  $Q_0$  та геометричних параметрів установки.

Для побудови витратної характеристики ерліфта  $Q_0 - Q_w$  на основі рівнянь (1) – (7) враховано лінійний характер зміни тиску уздовж потоку і попередньо вирішено низку важливих питань теорії ерліфта, пов'язаних з визначенням істинної концентрації повітря у довільному живому перерізі висхідного газорідинного потоку [11], істинних швидкостей фаз [10],

інтенсивності сили тертя газорідної суміші до стінок труби [12], а також втрат напору на тертя і ковзання фаз та робочого тиску у змішувачі  $P_1$ .

В результаті вирішення вищезазначених питань, рівняння (3) перетворюється до рівняння витратної характеристики ерліфта, яке пов'язує величини  $Q_w$ ,  $Q_0$ ,  $P_1$ , а також гідравлічний коефіцієнт тертя, газовміст та геометричні характеристики конструктивних елементів ерліфтною установки.

В даній роботі розроблено методику гідравлічного розрахунку ерліфта з пробковою структурою водоповітряної суміші. Саме для таких ерліфтів визначено гідравлічний коефіцієнт тертя  $\lambda$  на основі одержаного рівняння витратної характеристики з використанням відомих експериментальних витратних характеристик [7,8,13,14,15]. В результаті виявлено, зокрема, автомодельну область гідравлічного опору, в якій  $\lambda = 0,05$ .

На рис. 1–6 наведені експериментальні витратні характеристики, запозичені із [9], а також розрахункові, одержані за методикою [9], розробленою на основі рівняння імпульса для газорідного потоку, та, крім цього, за нашою методикою, розробленою на основі енергетичної моделі. На цих рисунках видно, що розрахункові витратні характеристики ерліфта, одержані нами, цілком задовільно узгоджуються з відповідними експериментальними та розрахунковими характеристиками, наведеними в[9].

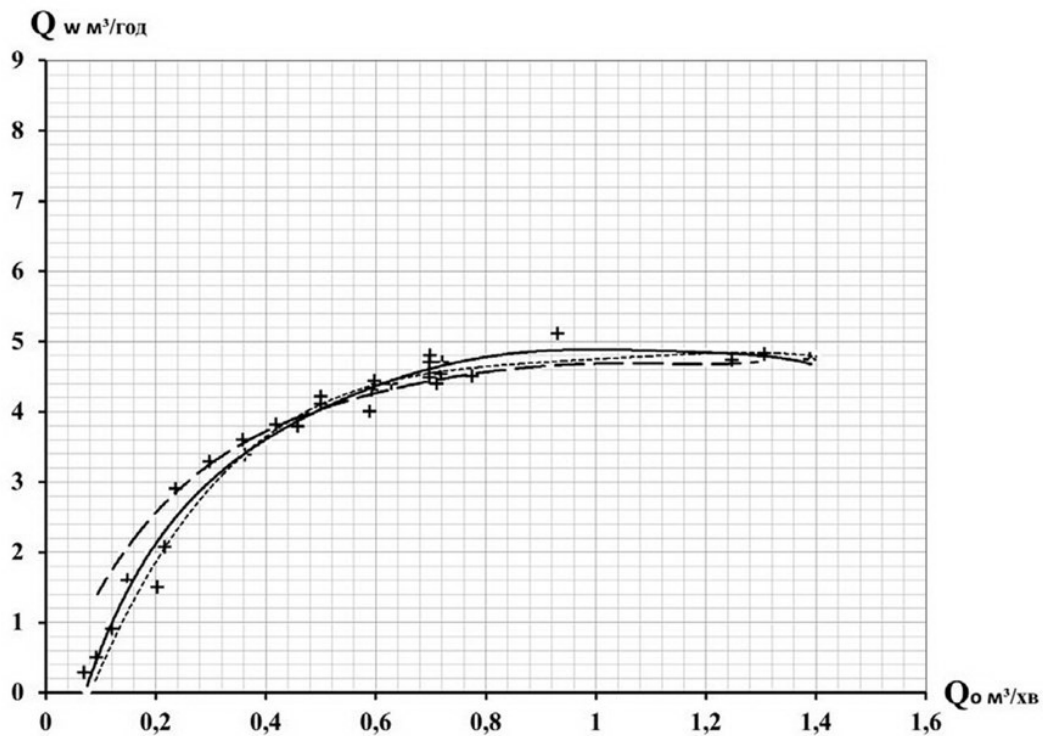


Рис. 1. Витратна характеристика ерліфта  $D = 0,05$  м,  $H = 14$  м,

$h = 5,5$  м,  $d_{\pi} = 0,04$  м,  $L_{\pi} = 1,615$  м : +, ——— — експеримент [8] ;

----- — розрахунок за методикою [9], ..... — розрахунок за методикою ІГМ НАНУ

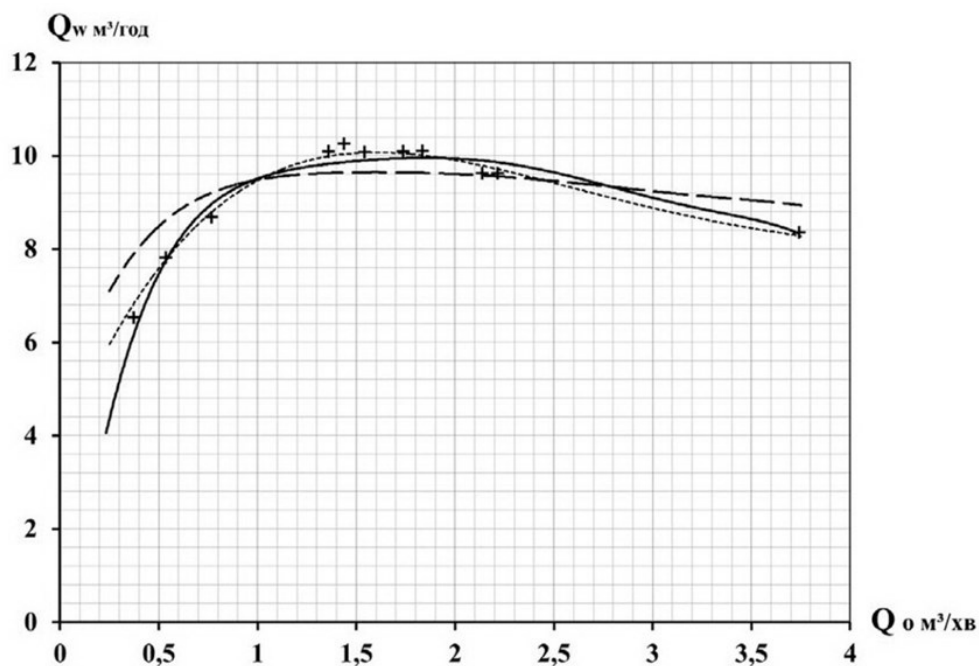


Рис. 2. Витратна характеристика ерліфта  $D = 0,06 \text{ м}$ ,  $H = 16 \text{ м}$ ,  $h = 8 \text{ м}$ ,  $d_n = 0,05 \text{ м}$ ,  $L_n = 2,49 \text{ м}$ : +, ———— — експеримент [13]; ———— — розрахунок за методикою [9], ..... — розрахунок за методикою ІГМ НАНУ

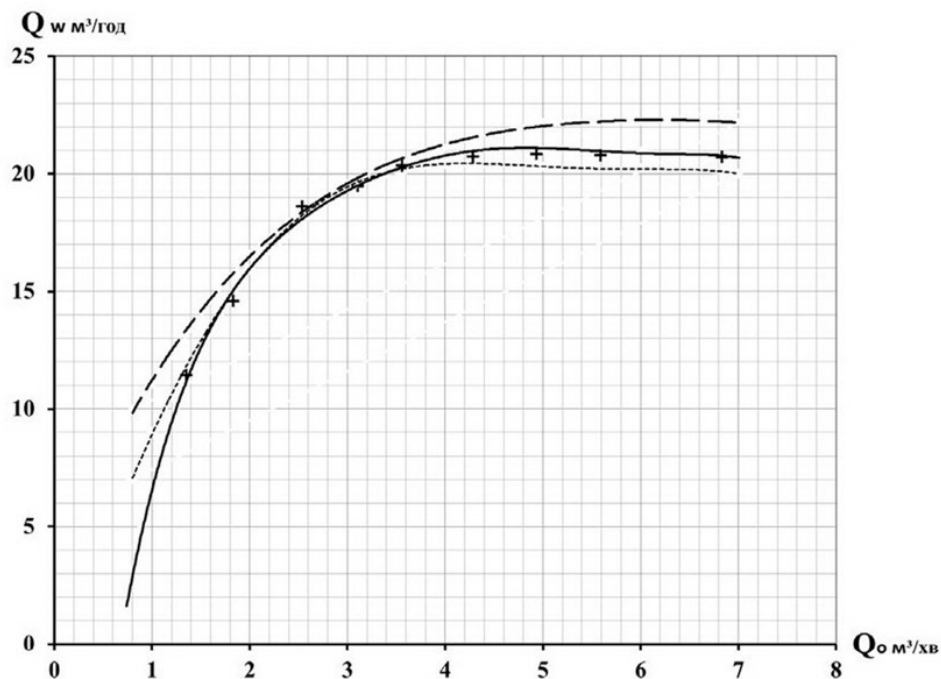


Рис. 3. Витратна характеристика ерліфта  $D = 0,1 \text{ м}$ ,  $H = 16,9 \text{ м}$ ,  $h = 5,9 \text{ м}$ ,  $d_n = 0,07 \text{ м}$ ,  $L_n = 1,5 \text{ м}$ : +, ———— — експеримент [14]; ———— — розрахунок за методикою [9], ..... — розрахунок за методикою ІГМ НАНУ



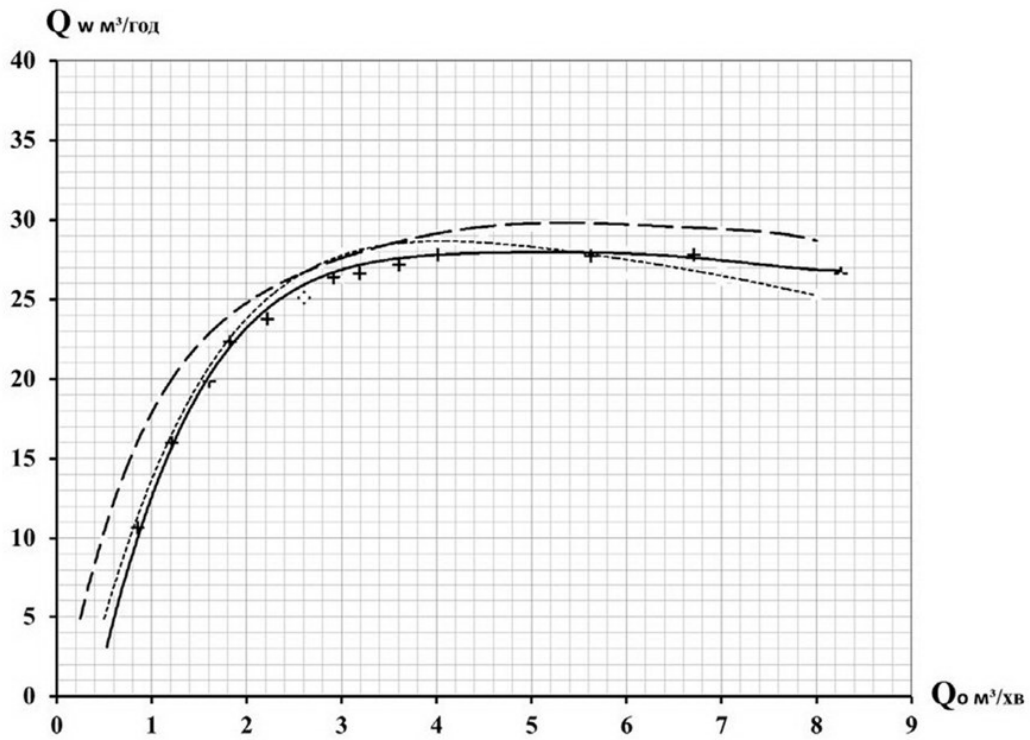


Рис. 4. Витратна характеристика ерліфта  $D = 0,1$  м,  $H = 16,9$  м,  $h = 7,5$  м,  $d_n = 0,07$  м,  $L_n = 3,5$  м: +, — — — — — експеримент [14];  
 — — — — — розрахунок за методикою [9], ..... — розрахунок за методикою ІГМ НАНУ

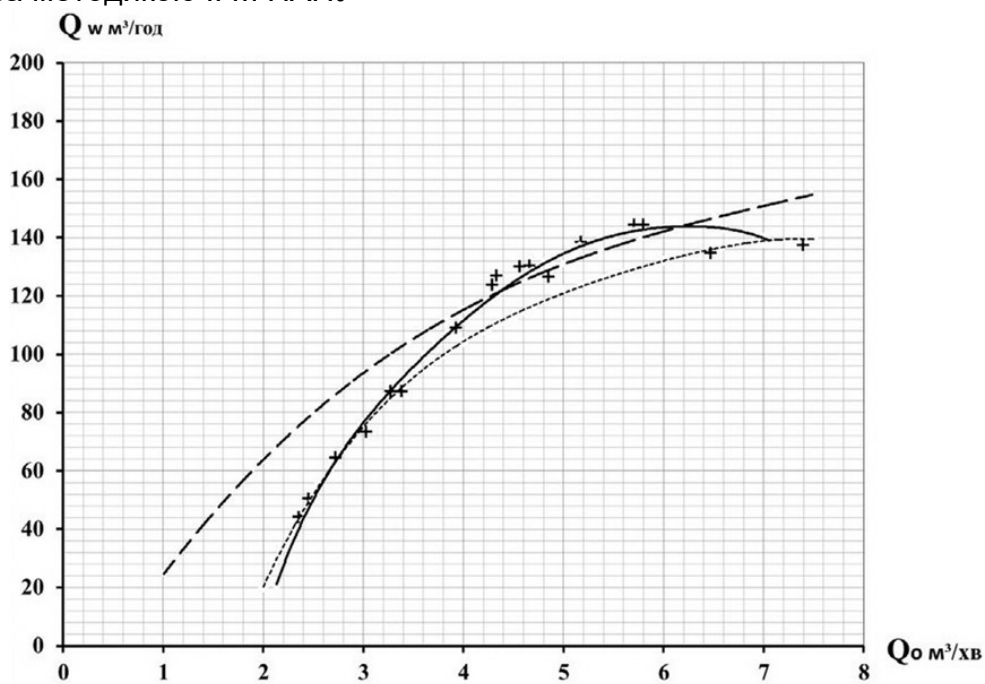


Рис. 5. Витратна характеристика ерліфта  $D = 0,15$  м,  $H = 51,4$  м,  $h = 47$  м,  $d_n = 0,15$  м,  $L_n = 21$  м: +, — — — — — експеримент [7];  
 — — — — — розрахунок за методикою [9], ..... — розрахунок за методикою ІГМ НАНУ

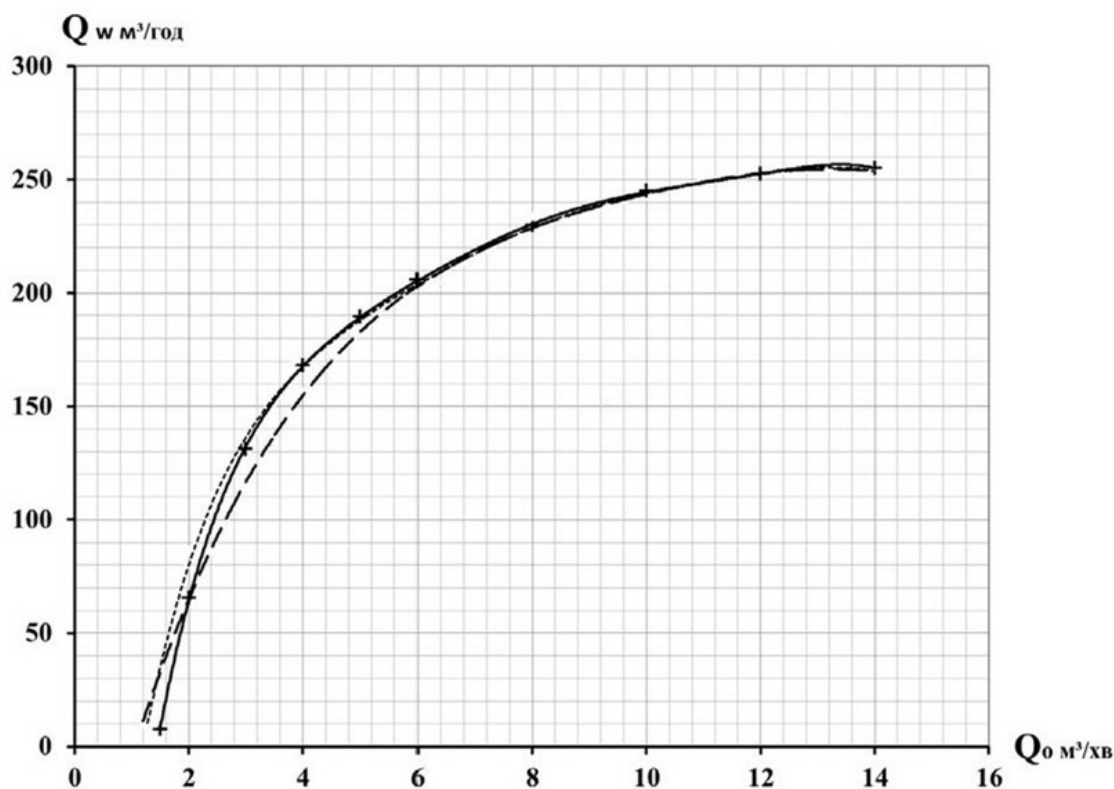


Рис. 6. Витратна характеристика ерліфта  $D = 0,25$  м,  $H = 11,45$  м,  $h = 8$  м,  $d_{\pi} = 0,15$  м,  $L_{\pi} = 1,07$  м: +, ———— — експеримент [15];  
 - - - - - — розрахунок за методикою [9], ..... — розрахунок за методикою ІГМ НАНУ

У підписах до рис. 1 – 6 використані позначення:  $d_{\pi}$ ,  $L_{\pi}$  – діаметр і довжина підвідної труби;  $h$  – глибина занурення змішувача.

Відзначимо ще один цікавий та невідомий раніше результат виконаних нами досліджень. Річ у тому, що обчислені при розрахунках витратних характеристик вищезазначених ерліфтів втрати напора на тертя  $h_{\text{ТР}}$  і ковзання фаз  $h_k$  дозволяють визначити долю втрат напора  $h_k$  у сумарних втратах  $(h_{\text{ТР}} + h_k)$ . Установлено, що співвідношення  $h_k / (h_{\text{ТР}} + h_k)$  не є сталою величиною, а залежить від абсолютного безрозмірного тиску  $\bar{P}_1 = \frac{P_1}{P_{\text{атм}}}$  (рис 7).

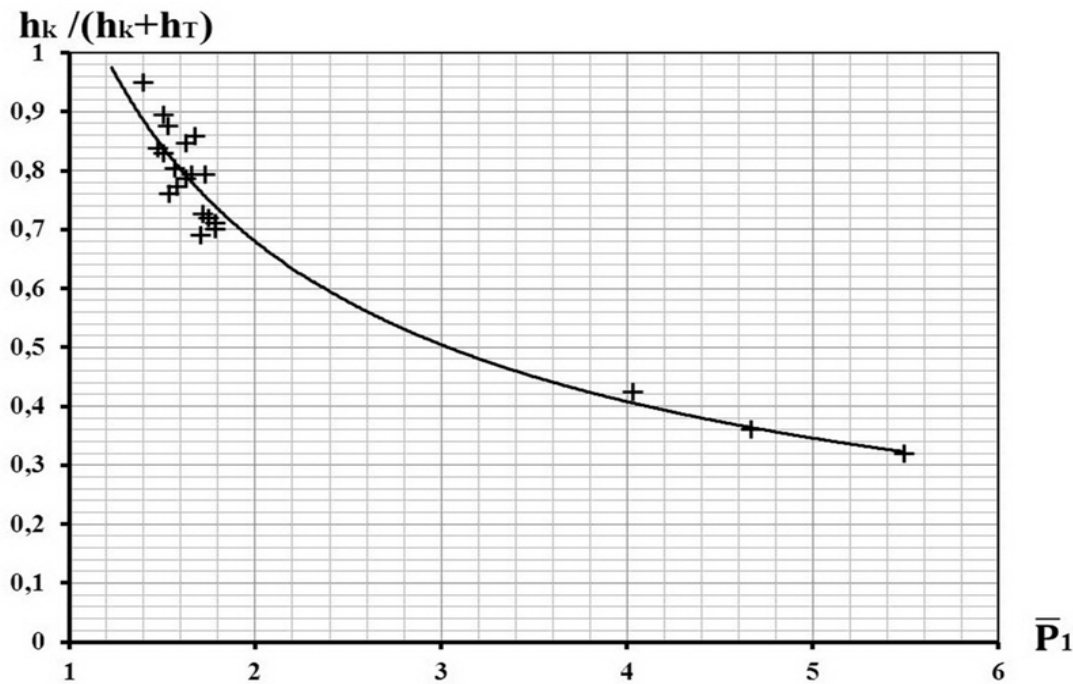


Рис. 7. Залежність  $h_k / (h_{тр} + h_k)$  від  $\bar{P}_1$ .

Згідно з рис. 7, величина  $h_k$  може складати від 30 % до 90 % повних втрат напору ( $h_{тр} + h_k$ ). Одержаний результат стосується ерліфтів з пробковою структурою газорідної суміші

### Список літератури

1. *Кириченко Е.О.* Механика глубоководных гидротранспортных систем в морском горном деле. ДНГУ, Днепропетровск. 2009. 344 с.
2. *Кутателадзе С.С., Стырикович М.А.* Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия. 1977. 249 с.
3. *Конonenко А.П.* Уравнения сохранения массы и импульса вертикально восходящего водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Промышленная гидравлика и пневматика, №3(13). 2006. С.44-48.
4. *Приходько М.А.* Гідродинаміка бульбашкових газо-паро-рідинних систем. К.: Інст. гідромех. НАН України. 2007. 473 с.
5. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения. М.: Мир. 1977. 440 с.
6. *Кріль С.І.* Гідралічні рівняння для усталеного ізотермічного руху газорідних сумішей в трубах // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. К.: КНУБА. Вип.22. С.132-139.
7. *Адамов Б.И.* Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала: Дисс...канд.техн.наук: 05.05.06: Донецк: ДПИ, 1982. 323 с.

8. *Стифеев Ф.Ф.* Разработка эрлифтов для подъема пульп повышенной плотности: Дисс...канд.техн.наук: 05.05.06: Донецк: ДПИ, 1985. 262 с.

9. *Кононенко А.П.* Теория и рабочий процесс эрлифта //Дисс...докт.техн.наук: 05.05.06: Донецк, 2007. 565 с.

10. *Криль С.И., Скороход И.В., Фадеичев В.В., Орлова Л.С.* К вопросу об определении расходной характеристики эрлифта на основе гидравлических уравнений течения газожидкостных смесей в вертикальных трубах // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА. Вип.25. 2015. С.131-136.

11. *Криль С.И., Кононенко А.П.* Определение истинного газосодержания водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА. Вип.23. 2014. С.154-161.

12. *Криль С.И., Кононенко А.П.* О потерях напора на трение при движении водовоздушной смеси в подъемной вертикальной трубе эрлифта // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА. Вип.24. 2014. С.155-163.

13. *Козыряцкий Л.Н.* Исследование и разработка уточненного расчета эрлифтных установок горной промышленности: Дисс...канд.техн.наук: 05.05.06: Донецк: ДПИ, 1976. 197 с.

14. *Стегниенко А.П.* Исследование и разработка методов управления режимами работы шахтных эрлифтов: Дисс...канд.техн.наук: 05.05.06: Донецк: ДПИ, 1978. 242 с.

15. *Костанда В.С.* Исследование и разработка эрлифтных и углесосно-эрлифтных подъемников гидрошахт: Дисс...канд.техн.наук: 05.05.06: Донецк: ДПИ. 1963, т.І. 209с., т.ІІ. 140 с.

*Стаття надійшла до редакції 3.05.17*

В.Д. ЛЕВИЦЬКА

П.Д. ХОРУЖИЙ, доктор технічних наук,

Інститут водних проблем і меліорації НААН України

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПРОТИФІЛЬТРАЦІЙНИХ СПОРУД ДЛЯ ЗАХИСТУ ТЕРИТОРІЙ ВІД ПІДТОПЛЕННЯ З ДНІПРОВСЬКИХ ВОДОСХОВИЩ**

*Проаналізовано роботу комплексу захисних споруд від підтоплень територій, які знаходяться у зоні впливу Дніпровських водосховищ. Запропоновано новий більш ефективний спосіб зниження підземних вод на захисній завісі Кам'янський Под.*

**Ключові слова:** протифільтраційна завіса; водопонижуюча свердловина, вертикальний дренаж із ерлітною системою водопониження; вертикальний дренаж із сифонною системою водопониження, питомі витрати електроенергії.

*Проаналізовано роботу комплексу захисних споруд від підтоплень територій, які знаходяться у зоні впливу Дніпровських водосховищ. Запропоновано новий більш ефективний спосіб зниження підземних вод на захисній завісі Кам'янський Под.*

**Ключові слова:** протифільтраційна завіса; водопонижуюча свердловина, вертикальний дренаж із ерлітною системою водопониження; вертикальний дренаж із сифонною системою водопониження, питомі витрати електроенергії.

*Проаналізовано роботу комплексу захисних споруд від підтоплень територій, які знаходяться у зоні впливу Дніпровських водосховищ. Запропоновано новий більш ефективний спосіб зниження підземних вод на захисній завісі Кам'янський Под.*

**Ключові слова:** протифільтраційна завіса; водопонижуюча свердловина, вертикальний дренаж із ерлітною системою водопониження; вертикальний дренаж із сифонною системою водопониження, питомі витрати електроенергії.

**Вступ.** Ріка Дніпро є основним джерелом водопостачання 2/3 населення з 19 областей України та територій розміщених у межах басейну, а також півдня і південного сходу держави.

З середини 20 століття в Україні створено шість дніпровських водосховищ для надійного безперебійного забезпечення водою населення, промисловості та сільгоспвиробництва, сумарним об'ємом 43,8 км<sup>3</sup>. Корисний

об'єм водосховищ становить 18,6 км<sup>3</sup> на рік з яких щороку для народного господарства забирається 1...15 км<sup>3</sup>.

При цьому за рахунок водних ресурсів р.Дніпро підвищилась водозабезпеченість у Херсонській області у 5,5 разів; у Кіровоградській – у 2,5 рази; у Дніпропетровській – у 3 рази.

Усі шість Дніпровських водосховищ мають комплексне призначення. Їх використовують: водопостачальники (промислові та побутові); енергетики (6 ГЕС); рибогосподарники, водотранспортники; сільгоспвиробники (зрошувальне землеробство тощо).

**Актуальність.** Загальнодержавною цільовою програмою розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року, затвердженою Законом України від 24 травня 2012 року № 4836-VI, передбачено проведення заходів щодо інженерного захисту від підтоплення сільськогосподарських угідь і населених пунктів [1].

Підвищення рівня води, яке відбулося під час створення Дніпровських водосховищ призвело до затоплення та підтоплення великої території. Для захисту від підтоплень 24 об'єктів площею 254 тис. га [2]. у зоні впливу Дніпровських водосховищ створено захисний комплекс (табл.1), що включає в себе насосні та компресорні станції у кількості 31 шт., на яких встановлено 142 насоси сумарною потужністю 66 550 кВт і загальною продуктивністю майже 516 м<sup>3</sup>/с [3]. Щорічно на перекачування із захисних територій води витрачається 50...70 млн. кВт-год електроенергії. Для зменшення вартості перекачування води із захисних масивів енергоємне обладнання використовують у нічні години, коли тариф на електроенергію є значно меншим. Таким чином протягом 2016 року було зекономлено за рахунок багатотарифного обліку електроенергії та роботи насосних станцій у межах економних тарифних зон 27,8 млн. грн.

Як бачимо із табл.1 найбільші площі захищені під підтоплення мають масиви Дніпровсько-Деснянський - 48,8 тис. га та Орільський – 48,6 тис. га. Найменшу площу 0,08 тис га. має масив Захист міста Ржищів.

Загалом у прибережній смузі водосховищ збудовано понад 222 км каналів, захисні дамби довжиною 300,6 км, 70 гідротехнічних споруд (ГТС), та понад 147 км берегоукріплень. Балансова вартість ГТС складає понад 700 млн. грн. Щороку із захищених територій відкачується 2...3 км<sup>3</sup> води.

Крім того, до складу основних захисних споруд, які знаходяться на балансі підвідомчих організацій Дніпровського басейного управління водних ресурсів входять 3 компресорні станції, що забезпечують роботу 370 свердловин протифільтраційних завіс для підтримання встановленого рівня ґрунтових вод на правобережжі водосховищ у містах Нікополі та Кременчуці та на лівому березі м. Кам'янка-Дніпровська, с. Велика Знам'янка, с.Водяне та ін.

**Підвищення ефективності роботи протифільтраційних споруд Кам'янського Поду.** Комплекс захисних споруд Кам'янського Поду побудований у 1956 році. Варто зазначити, що при спорудженні греблі Каховської ГЕС рівень води в р.Дніпро було піднято до відмітки 16,0 м. У

Таблиця 1

**Захищені від підтоплення масиви у зоні впливу Дніпровських водосховищ**

Водосховище	Масив	Площа, тис. га
Київське	Дніпровсько-Прип'ятський	7,0
	Дніпровсько-Деснянський	48,8
	Захист заплави р. Ірпінь	2,5
Канівське	Бортничі–Вишеньки	9,5
	Проців–Кийлів	5,24
	Захист заплави річок Трубіж і Карань	30,0
	Конча-Заспа	1,4
	Конча-Заспа–Плюти	2,9
	Захист м. Ржищів*	0,08
Кременчуцьке	Золотоніський	8,81
	Оболонський	16,6
	Вільшанський	9,37
	Будище-Свидівський	6,83
	Захист м. Черкаси	0,91
	Червонослобідський	0,9
	Захист долини р. Тясмин	16,5
	Захист м. Світловодськ	0,7
Кам'янське (Дніпродзержинське)	Захист м. Кременчук	20,6
	Орільський	48,6
	Захист м. Верхньодніпровськ	0,77
Каховське	Кам'янський Під	6,7
	Східний район марганцевих родовищ	2,34
	Захист м. Нікополя	0,14
	Західний район марганцевих родовищ	6,82
<b>Разом</b>		<b>254,0</b>

створі Нікополь – Кам'янка-Дніпровська води піднялися на 10...11 м, створюючи могутній напірний фронт. Для боротьби з підняттям рівня підземних вод у проекті захисних споруд Українського відділення інституту «Гідроенергопроект» передбачалось будівництво дренажу. При проектуванні розглядались наступні варіанти захисту.

1. Горизонтальний систематичний дренаж відкритого та закритого типів.
2. Комбінований дренаж.
3. Вертикальний дренаж.

При порівнянні трьох варіантів перевагу надали третьому варіанту, оскільки він був найдешевшим і не вимагав порушення існуючої інфраструктури. До його складу входять 3 дамби: Кам'янська (8,6 км),

Знам'янська (7,2 км) та Білозірська (1,64 км) дамби, Кам'янська та Знам'янська протифільтраційні завіси із системи берегових вертикальних дренажів, які налічують відповідно 191 і 81 свердловину, компресорні стації та Білозерську насосну станцію, обладнану двома насосними агрегатами типу ОПВ-2-110, загальною продуктивністю 10 м<sup>3</sup>/с. [4]

Кам'янка-Дніпровська протифільтраційна завіса (ПФЗ) має довжину 9,87 км і захищає від підтоплення 4470 га земель села Водяне та 8,8 тис. будівель з населенням близько 22 тис. осіб у м. Кам'янка-Дніпровська. [5]

Аналіз сучасного стану захисних споруд Кам'янського Поду показує, що багато свердловин вертикального дренажу Кам'янка-Дніпровської та Знам'янської ПФЗ регулярно потребують перебудування через зниження дебіту, що призводить до різкого підвищення рівня підземних вод, створюючи надзвичайні ситуації на забудованій території. Зокрема, у січні 2015 р. горизонт ґрунтових вод у прибережних населених пунктах Кам'янка-Дніпровського району піднявся до позначки 0,94 м від поверхні, що завдало збитків 300 дворам, а саме: підтоплення погребів, просадки фундаментів та тріщини у стінах у тому числі житлових будинків. [6]

### **Основні причини незадовільної роботи існуючих ПФЗ.**

1. Застосування ерліфтної системи відкачування води із дренажних свердловин недоцільно у даному регіоні, оскільки підземні води мають високий вміст гідрокарбонату заліза (0,41...3,34 мг/дм<sup>3</sup>). При ерліфтному способі водопідйому та наявності у дренажних водах гідрокарбонату заліза (Fe(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) такі свердловини працюють як незалізнювальні установки з утворенням нерозчинного осаду з гідроксиду заліза (Fe(OH)<sub>3</sub>) [4]. Пластівці тривалентного гідроксиду заліза швидко кольматують дротяні фільтри, у яких ширина щілини між витками дроту становить 1,5...2 мм.

2. Як наслідок, ККД вертикального дренажу із ерліфтною системою водопониження постійно знижується в міру зростання кольматації фільтрів. Коли дебіт свердловин знижується на 50...60% (через 5-8 років), такі свердловини перебудують. Проте, на постійні поновлення та введення в експлуатацію нових свердловин необхідні немалі кошти. [7]

Нами було запропоновано інше технологічне рішення проблеми підтоплення даного регіону, а саме використання горизонтальних дренажів, для самоплинного наповнення водозбірних колодязів, яке доцільно застосовувати при новому будівництві. [8]

Для інтенсифікації роботи існуючої системи протифільтраційного захисту на даному об'єкті ми пропонуємо застосувати інший підхід вирішення цієї проблеми, а саме: вертикальний дренаж із сифонною системою відкачування води зі свердловин.

У місті Кременчук побудовано систему вертикального дренажу із водозабором і відведенням води зі свердловин сифонним збірним водоводом у водоприймальний колодязь, з якого вода відкачується відцентровими насосами з горизонтальним валом, що мають високий ККД, а отже потрібні менші питомі витрати електроенергії. [9]



На рис. 1 показано схему роботи вертикального дренажу із сифонною системою відкачування води зі свердловин. Таку систему можна застосовувати при глибині до динамічного рівня води у водоносному пласті (лінія 9 на рис. 2) не більше 10 м.

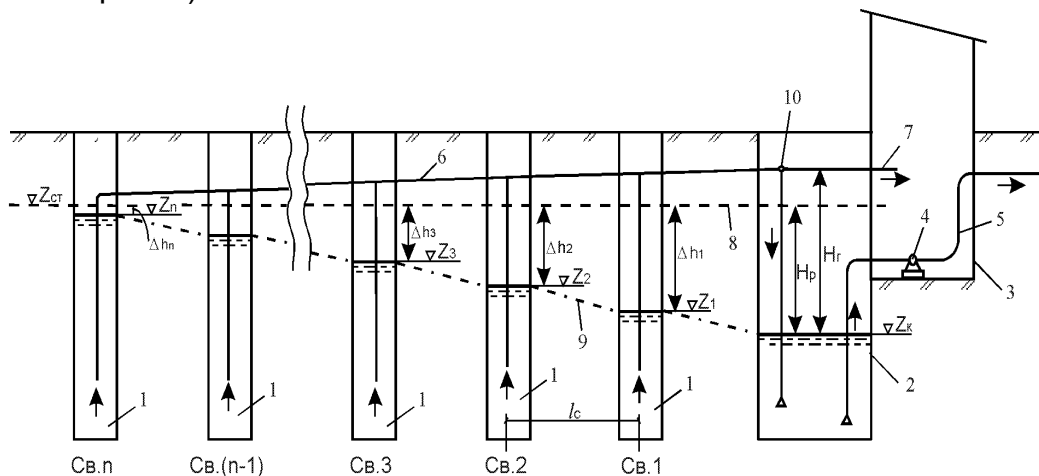


Рис.1. Схема відведення води від групи з  $n$  свердловин сифонним збірним водоводом: 1 – водозабірні свердловини; 2 – водоприймальний збірний колодезь; 3 – насосна станція; 4 – горизонтальний відцентровий насос; 5 – напірний трубопровід; 6 – сифонний збірний водовід; 7 – труба до вакуум-насоса; 8 – лінія статичного рівня води у водоносному пласті; 9 – п'єзометрична лінія в сифонному збірному водоводі; 10 – найвища точка сифонного водоводу

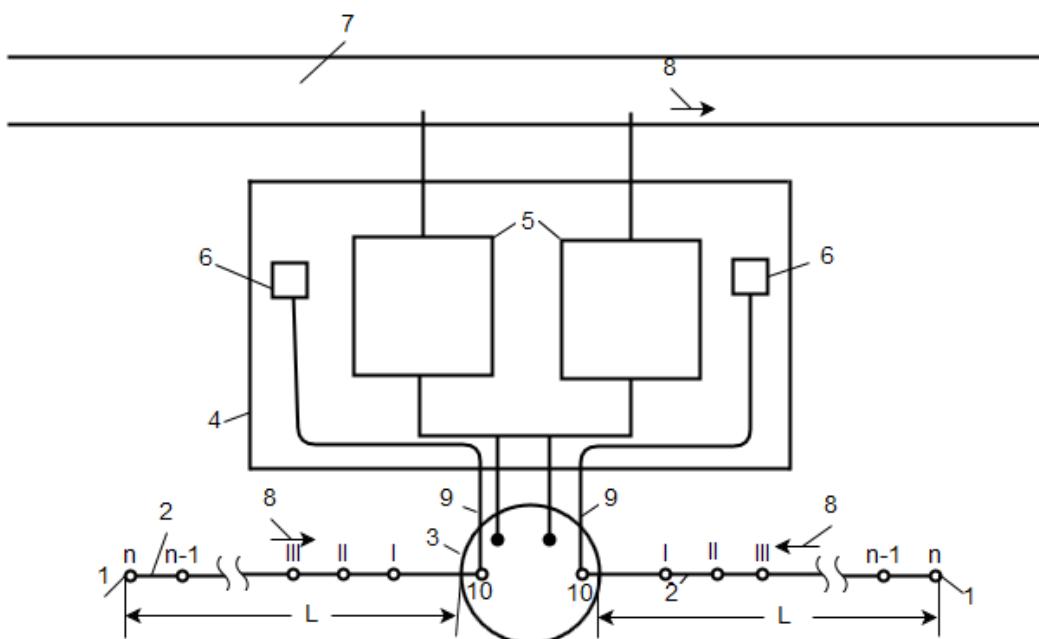


Рис.2. Схема влаштування сифонної системи водовідбору з дренажних свердловин на Кам'янка-Дніпровській протифільтраційній завісі: 1 – дренажні свердловини (I, II, III, ...  $n-1$ ,  $n$ ); 2 – сифонний збірний водовід; 3 – водоприймальний збірний колодезь; 4 – насосна станція; 5 – горизонтальні відцентрові насоси; 6 – вакуум-насоси; 7 – водоскидний колектор; 8 – напрям руху води; 9 – труба до вакуум-насоса; 10 – найвища точка у сифонному водоводі, до якої підключається вакуум-насос

Сифонний збірний водовід 6 прокладають із безперервним підйомом у напрямку водоприймального збірного колодязя 2 та похилом не менше 0,1%. Його прокладають вище п'єзометричної лінії 9 і нижче глибини промерзання ґрунтів. При створенні вакууму в сифонному збірному водоводі за допомогою вакуум-насоса під дією атмосферного тиску він заповнюється водою. Для забезпечення руху води по сифонному водоводу слід створити різницю рівнів води в свердловинах 1 і в збірному колодязі 2.

Ми пропонуємо переобладнати Кам'янка-Дніпровську протифільтраційну завісу з ерліфтною системою водовідбору з дренажних свердловин на сифонну систему.

При виконанні таких робіт ліквідуються компресорні станції та повітряпровідні труби а додатково необхідно збудувати рис.1 водоприймальні збірні колодязі 2, насосні станції 3 та сифонні збірні водоводи для транспортування води від дренажних свердловин 1 до водоприймального колодязя. На рис.2 показана схема двосторонньої подачі води з дренажних свердловин до водоприймального колодязя.

Сифонна система відбору води з дренажних свердловин працює наступним чином. При відкачуванні повітря із сифонних збірних водоводів 2 за допомогою вакуум-насосів 6, підключених у їхній найвищій точці 10 відбувається їх заповнення водою, що рухається від дренажних свердловин 1 (I, II, III, ... n-1, n) до водоприймального збірного колодязя 3 завдяки різниці рівнів води у свердловинах 1 і цьому колодязі. Величина вакууму в сифоні визначається за формулою 1.

$$H_{\text{вак}} = H_{\Gamma} + h_{\Gamma} + \Sigma h, \text{ м} \quad (1)$$

де  $H_{\Gamma}$  – висота розташування найвищої точки сифона 10 над динамічним рівнем води в збірному колодязі 2;  $h_{\Gamma}$  – втрати напору в низхідній ділянці водоводу від точки 10 до колодязя;  $\Sigma h$  – сумарні втрати напору в сифонному збірному водоводі.

Як видно рис.1, витрата води з кожної свердловини, а отже і величина зниження рівня води в ній буде різною та вона зменшується зі збільшенням віддаленості свердловини від водоприймального збірного колодязя 3.

Основні вимоги при проектуванні сифонної системи відкачування води з дренажних свердловин:

- сифонний водовід прокладають із безперервним підйомом до колодязя, похилом не менше 0,1% і нижче глибини промерзання ґрунтів;
- динамічний рівень води у кожній свердловині не має перевищувати припустимих значень;
- величина вакууму у сифоні має не перевищувати допустимих значень (7...8 м).

### **Порівняння ефективності роботи вертикальних дренажів з ерліфтною та сифонною системами водовідбору зі свердловин**

У Нікопольському регіональному управлінні водних ресурсів побудовано та експлуатуються вертикальні дренажі з відкачуванням води зі свердловин за допомогою ерліфтів, до яких подається повітряпроводами

стиснене повітря від компресорних станцій. Оскільки ерліфти мають низький ККД, то питомі витрати електроенергії будуть значно більшими (табл. 2).

Таблиця 2

**Техніко-економічні показники роботи вертикальних дренажів з ерліфтною та сифонною системами водовідбору від підтоплення населених пунктів із Каховського та Дніпродзержинського водосховищ**

№ з/п	Найменування протифільтраційних завіс	Річний об'єм перекачаної води, тис.м <sup>3</sup>	Річна витрата електроенергії тис. кВт·год.	Питома витрата електроенергії кВт·год./м <sup>3</sup>	Середня питома витрата електроенергії для ерліфтної та сифонної систем водовідбору кВт·год./м <sup>3</sup>
1	Кам'янська	29940	6732	0,2248	0,218
2	Знам'янська	6932	1484	0,2141	
3	Нікопольська	3939	848	0,2153	
1*	Правобережна м.Кременчук	433,7	17,6868	0,04078	0,040*
2*	Лівобережна м.Кременчук	1268	49,7548	0,03924	

\* позначено техніко-економічні показники із вертикальних дренажів з сифонною системою водовідбору

Як видно з табл. 2, середня питома витрата електроенергії перекачування 1 м<sup>3</sup> води вертикальними дренажними системами з ерліфтною та сифонною системами водовідбору відрізняються в рази. Отже, витрати електроенергії при відкачуванні сифонною системою в середньому в  $0,218/0,040 = 5,45$  разів нижча.

Це пояснюється тим, що ККД горизонтальних відцентрових насосів значно більший, ніж ерліфтів. Крім того, треба зауважити, що в системах із сифонним водовідбором значно стабільніша та більш довговічна робота дренажних свердловин, ніж при ерліфтному водопідйомі, оскільки не відбувається така інтенсивна кольматація фільтрів осадам із гідроксиду заліза, що утворюється в свердловинах з ерліфтною системою водовідбору.

**Висновки**

1. Створення Дніпровських водосховищ призвело до необхідності будівництва протифільтраційних завіс для захисту прилеглих територій від підтоплення інфільтраційними водами.

2. Застосування вертикального дренажу з ерліфтною системою відкачування води з дренажних свердловин на Кам'янка-Дніпровській і Знам'янській ПФЗ призводить до необхідності регулярного перебудування свердловин внаслідок їхньої кольматації та значних перевитрат електроенергії.

3. Для забезпечення стабільної роботи вертикального дренажу на Кам'янка-Дніпровській та Знам'янській ПФЗ і значного зменшення питомих витрат електроенергії доцільно ерліфтну систему відкачування води зі свердловин замінити сифонною системою.

### Список літератури

1. *Закон України* про затвердження Загальнодержавної цільової програми розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року.// Відомості Верховної Ради (ВВР), 2013, № 17, ст.146 // <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/4836-17>

2. *Вишневецький В.І.* Ріка Дніпро: Наукове видання К.: Інтерпрес ЛТД, 2011. 384 с.

3. *Схема захисту від шкідливої дії води населених пунктів, промислових підприємств та територій у зоні впливу дніпровських водосховищ у системі Дніпровського басейнового управління водних ресурсів* // <http://dbuwr.com.ua/zakhist-vid-shkidlivoji-diji-vod/perelik-nasosnikh-stantsij.html>

4. *П.Д.Хоружий, В.Д.Левицька* Шляхи покращення роботи комплексу захисних споруд Кам'янського Поду/ П.Д.Хоружий, В.Д.Левицька // Меліорація і водне господарство. 2016, вип.104. С.119-125

5. *В.Д.Левицька* Система заходів для раціонального використання інфільтраційних вод у зоні впливу захисних споруд Кам'янського Поду // Вдосконалення гідротехнічних систем та водогосподарських технологій: Збірка матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон: Вид-во ПП «ЛТ-Офіс», 2017. С.116-119.

6. *Регіон Запоріжжя: Знову дощуляє підтоплення.* //Газета «Голос України» № 17 (6021) 31 січня 2015 р.

7. *Реконструкція гідротехнічних споруд захисних масивів дніпровських водосховищ.* Державний інвестиційний проект. Вишгород 2015 <http://dbuwr.com.ua/docs/invpro.pdf>

8. *П.Д. Хоружий, В.Д. Левицька* Комплексне використання інфільтраційних вод у зонах підтоплення від Дніпровського каскаду водосховищ // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки: Науково-технічний збірник. 2016. Вип. 27 / Гол. ред. А.М.Кравчук. К.:КНУБА, 2016. С.400-407.

9. *Сташук В.А.* Еколого-економічні основи басейнового управління водними ресурсами. Під заг. ред. П. І. Коваленка.//Наукове видання Дніпропетровськ: Зоря, 2006. 480 с.

*Стаття надійшла до редакції 7.11.17*

О.В. МАТЯШ, кандидат технічних наук  
В.Г. НОВОХАТНІЙ, доктор технічних наук  
І.С. УСЕНКО, кандидат технічних наук  
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

## ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ВОДОПРОВІДНИХ МЕТАЛЕВИХ ТРУБ ЗА ДАНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Зібрано та опрацьовано статистичні дані щодо відмов водопровідних металевих труб м. Кременчук Полтавської області. У результаті математичного оброблення узагальнених статистичних даних розраховано кількісні показники безвідмовності та ремонтпридатності металевих водопровідних труб. Виконано порівняння отриманих результатів з нормативними документами та зроблено відповідні висновки та пропозиції.*

**Ключові слова:** водопровідні металеві труби, показники надійності, безвідмовність, ремонтпридатність.

*Собрано и обработано статистические данные об отказах водопроводных металлических труб г. Кременчуг Полтавской области. В результате математической обработки обобщенных статистических данных рассчитаны количественные показатели безотказности и ремонтпригодности металлических водопроводных труб. Выполнено сравнение полученных результатов с нормативными документами и сделаны соответствующие выводы и предложения.*

**Ключевые слова:** металлические водопроводные трубы, показатели надежности, безотказность, ремонтпригодность.

*The statistics on faults in plumbing metal pipes in Kremenchug, Poltava region, were collected and processed. As a result of mathematical processing of generalized statistical data, quantitative indicators of reliability and repair of metal water pipes are calculated. The comparison of the results with the normative documents and the corresponding conclusions and proposals have been made.*

**Keywords:** metal water pipes, indicators reliability, reliability, maintainability.

**Постановка проблеми.** Система водопостачання – це складний технічний «організм», який потребує постійного огляду та оновлення [1]. До його складу входять споруди, які утворюють три комплекси, а саме – водозабірний комплекс (споруди для забирання води з поверхневих та

підземних джерел), водоочищувальний комплекс (споруди з кондиціонування води), подавально-розподільний комплекс (насосні станції, водогони та водопровідні мережі) [2]. Вихід з ладу як окремих споруд, так і комплексів призводить до аварійних ситуацій та відсутності води у споживачів, що тягне за собою зупинку технологічних процесів у промисловому секторі, наростання невдоволення населення при відсутності комфортних умов, а з іншого боку – це недоотримання коштів за надані послуги та витрати на ліквідування аварій для комунального підприємства. На сьогоднішній день водопровідні системи населених пунктів України потребують оновлення, а відповідно – значних капіталовкладень. Найвагоміший та найуразливіший елемент системи водопостачання – це водопровідна мережа, яка давно вже відпрацювала нормативний термін експлуатації та перебуває на межі катастрофічної ситуації з точки зору працездатності та безпечності для населення [3]. Тому при проектуванні нових та реконструкції існуючих водопровідних мереж слід враховувати надійність труб, а саме їх безвідмовність та ремонтпридатність [4].

**Аналіз останніх досліджень.** Питання надійності подавально-розподільного комплексу системи водопостачання піднімають у своїх роботах провідні науковці України, доктора технічних наук, професори В.Г. Новохатній [2, 4,], А.О. Ткачук [6], П.Д. Хоружий [7]. Активно працюють над вирішенням проблемних моментів підвищення надійності у галузі водогосподарського комплексу ряд закордонних вчених, а саме Н. Hotłóś, F. Piechurski, J.R. Rak, A. Studzinski, B. Tchórzewska-Cieślak [8, 9, 10, 11]. Проте аналіз наукових джерел показує, що отримані числові показники надійності водопровідних трубопроводів потребують додаткових досліджень у кожному конкретному випадку, оскільки на надійність труб водопровідних мереж впливає ряд факторів, як при проектуванні так і при експлуатації мереж.

**Викладення основного матеріалу досліджень.** Для того щоб оцінити безвідмовність та ремонтпридатність труб ділянок водопровідної мережі міста Кременчук Полтавської області було зібрано і оброблено статистичні дані для металевих труб діаметром 50...400мм протягом 9 років. Загальна протяжність водопровідної мережі м. Кременчук складає близько 424км, з яких чавунних труб (55%), сталевих – (41%), незначний відсоток – азбестоцементні та пластмасові труби (4%). Були проаналізовані статистичні дані щодо пошкоджень металевих труб діаметром 50...300мм протягом 6 років і встановлено, що основними видами пошкоджень є: для чавунних труб – вихід цементу з розтрубів – 68%, поперечні переломи – 19%, корозія – 9%, пошкодження землерийною технікою – 4%; для сталевих труб – наскрізні свищі – 71%, порушення зварних з'єднань – 18%, корозія – 7%, пошкодження землерийною технікою – 4% та інші.

Для розрахунків надійності окремим елементом водопровідної мережі прийнято 1 км трубопроводу. З точки зору надійності, такий елемент є простим та відновлюваним, а в процесі роботи він може знаходитися лише в

двох станах: працездатності та відмови. Під відмовою елемента прийнято пошкодження труби на ділянці водопровідної мережі, при якому ділянку слід відключити для виконання ремонту або заміни. Основним показником безвідмовності водопровідних труб прийнято напрацювання на відмову  $T$  1км трубопроводу або обернену йому величину – питомий параметр потоку відмов  $\omega_0$  1км трубопроводу за рік (годину). Для розрахунку середнього значення питомого параметра потоку відмов  $\omega_0$  використана формула:

$$\omega_0^{mid} = \frac{n}{t \cdot \sum L}, \text{ 1/рік}\cdot\text{км або 1/год}\cdot\text{км}, \quad (1)$$

де  $n$  – кількість відмов ділянок водопровідної мережі;  $t$  – термін спостереження (роки або години);  $\sum L$  – протяжність водопровідної мережі відповідного діаметра, км.

Інтервальні оцінки для параметра потоку відмов обчислені відповідно до ГОСТ 11.005-74 [12] за формулами:

– нижня інтервальна оцінка параметра потоку відмов  $\omega_0$ :  $\omega_{0n} = \frac{\omega_0}{r_1}$ ; (2)

– верхня інтервальна оцінка параметра потоку відмов  $\omega_0$ :  $\omega_{0e} = \frac{\omega_0}{r_2}$ , (3)

де  $r_1, r_2$  – коефіцієнти для визначення інтервальних оцінок у випадку експоненціального розподілу, приймаються згідно з таблицями [12]. Розрахунки виконані у табличній формі (табл. 1).

Таблиця 1

**Розрахунок інтервальних оцінок для параметра потоку відмов  $\omega_0$   
м. Кременчук Полтавської області**

Труби ділянок мережі	Діаметр $D$ , мм	Об'єм вибірки $n$	Параметр потоку відмов $\omega_0$ , 1/рік·км:		
			середнє значення	інтервальна оцінка	
				нижня	верхня
Чавунні (сірий чавун)	50	29	4,93	3,52	6,66
	100	389	2,74	2,52	2,99
	150	150	1,72	1,50	1,98
	200	99	1,64	1,38	1,93
	250	72	1,03	0,84	1,25
	300	74	0,93	0,76	1,13
Сталеві	50	36	1,88	1,41	2,49
	100	142	1,65	1,43	1,91
	150	50	1,57	1,23	1,99
	200	34	1,45	1,07	1,91
	250	39	1,03	0,78	1,34
	300	28	0,65	0,46	0,88

У результаті математичного оброблення статистичних даних отримано аналітичні залежності (рис.1) параметра потоку відмов  $\omega_0$  від діаметра труб. Побудова аналітичних функцій на основі емпіричних даних виконана за допомогою електронних таблиць "Microsoft Excel SR-1" за програмою *Table Courve*.

Дослідження часу відновлення працездатності металевих труб водопровідних мереж м. Кременчук Полтавської області показав [13], що час відновлення підпорядкований експоненціальному закону розподілу (рис. 1). Аналіз статистичних даних показав, що 80% аварій на водопровідних мережах ліквідується протягом двох діб, а числові значення відновлення знаходяться в межах  $t_{min} = 23,3год \leq t_{mid} = 24,6год \leq t_{max} = 25,8год$ . Інтервальні оцінки для параметра потоку відмов обчислені відповідно до ГОСТ 11.005-74 [12] (рис. 2).

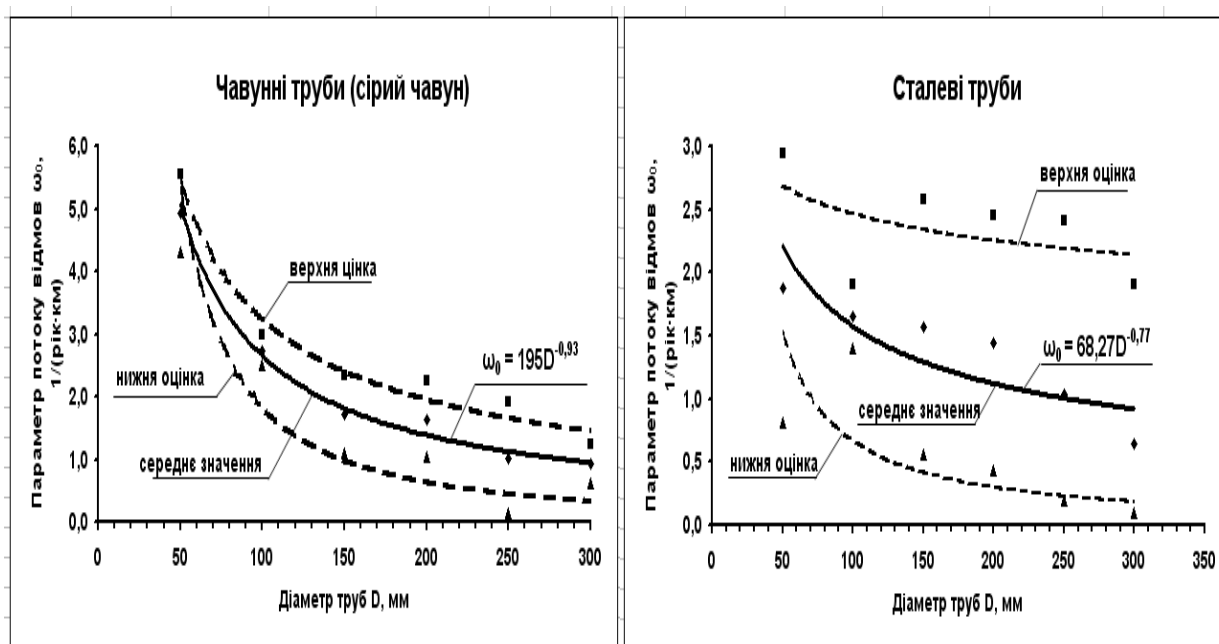


Рис. 1. Аналітична залежність  $\omega_0 = f(D)$  для металевих труб

Згідно з нормативною літературою [4] основними показниками надійності для відновлювальних елементів є середнє напрацювання між відмовами  $T$  та середня тривалість відновлення працездатності  $T_B$ , а комплексним показником – коефіцієнт готовності  $K_r$ . Обчислення кількісних значень показників надійності зведено до таблиці 2.



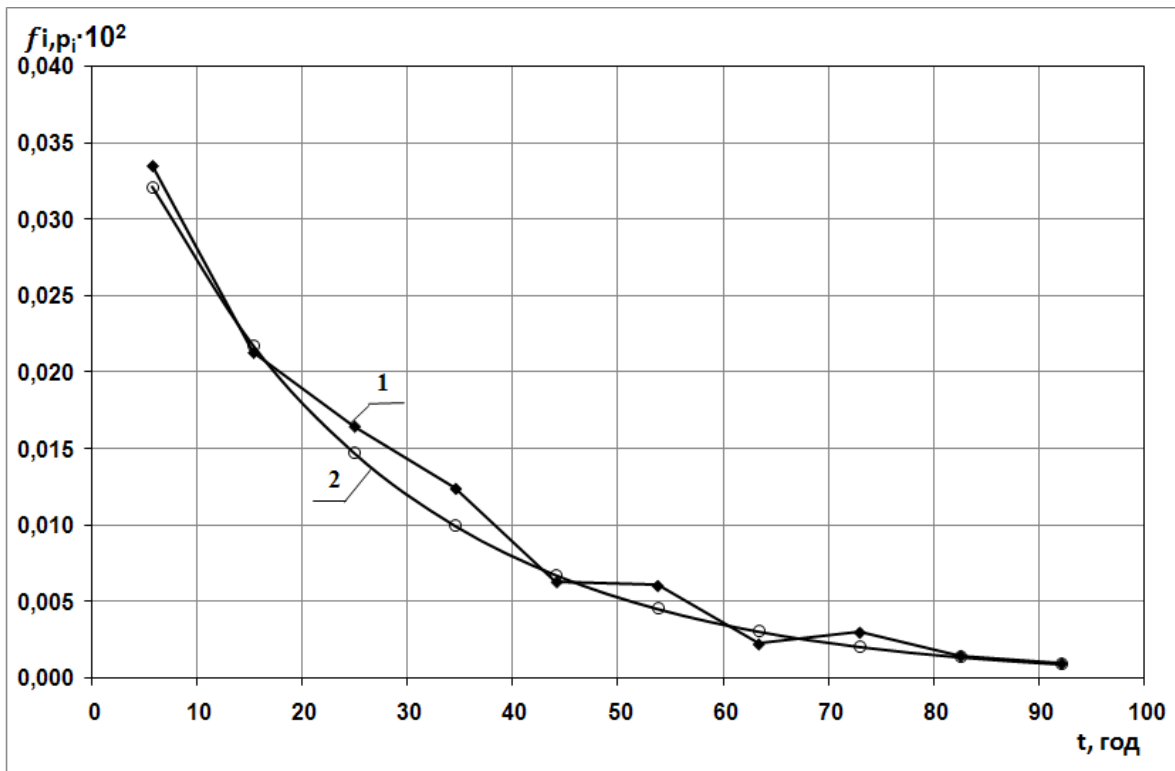


Рис. 2. Експериментальний полігон (1) і теоретичний (2) розподіл середнього часу відновлення працездатності металевих труб

Таблиця 2

**Розрахунок основних показників надійності водопровідних металевих труб м. Кременчук Полтавської області**

Труби ділянок мережі	Діаметр $D$ , мм	Середнє значення параметра потоку відмов $\omega_0$ , 1/(рік*км)	Середнє напрацювання на відмову $T$ , год	Середній час відновлення працездатності $T_B$ , год	Коефіцієнт готовності $K_G$
Чавунні (сірий чавун)	50	4,932	1751	42,0	0,9766
	100	2,743	3149	27,9	0,9912
	150	1,720	5024	29,3	0,9942
	200	1,643	5259	28,6	0,9946
	250	1,027	8410	25,4	0,9970
	300	0,930	9289	21,7	0,9977
Сталеві	50	1,881	4593	24,8	0,9946
	100	1,655	5221	21,4	0,9959
	150	1,569	5505	20,7	0,9962
	200	1,445	5978	25,5	0,9958
	250	1,032	8374	39,5	0,9953
	300	0,650	13293	18,0	0,9986

Норми щодо надійності водопостачання населення регламентуються «Правилами надання послуг», які затверджені постановою Кабінету Міністрів України №630 від 2005 [14]. У цій постанові вимагається, щоб "...допустимий термін відхилення показників з безперебійного водопостачання складає не більше 6 годин на добу та не більше 2-х разів на місяць". Таким чином "Правила" встановили показники надійності з безперервності та відновлюваності водопостачання, а саме – напрацювання на перерву  $T \leq 360$  год і середня тривалість відновлення водопостачання  $T_v \leq 6$  год. ДБН В.2.5–74:2013 [15] встановив, що: "...розрахунковий час відновлення водопостачання для системи водопостачання II категорії для діаметрів труб до 400 мм складає 10 год.", тобто середня тривалість відновлення водопостачання  $T_v \leq 10$  год. Порівняння отриманих результатів кількісних показників надійності (безвідмовність та ремонтпридатність з даними «Правилами надання послуг» [14] та ДБН В.2.5–74:2013 [15] вказують на відповідність за середнім часом напрацювання на відмову та на невідповідність за середнім часом відновлення працездатності (табл. 3).

Таблиця 3

**Порівняння основних показників надійності водопровідних металевих труб м. Кременчук Полтавської області**

	Середнє значення напрацюванням на відмову $T$ , год	Середнє значення часу відновлення працездатності $T_v$ , год	Коефіцієнт готовності $K_r$
«Правила надання послуг»	<b>360</b>	<b>6</b>	<b>0,9836</b>
ДБН В.2.5 74:2013 Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди.	не регламентується	$1,25 \cdot 8 = 10$	Неможливо обчислити
<b>Фактичні дані (м. Кременчук)</b>	<b>3150...13300</b>	<b>23,3...25,8</b>	<b>0,9927...0,9981</b>

**Висновки**

1. Поглиблений аналіз методами математичної статистики даних експлуатації щодо відмов металевих водопровідних труб м. Кременчук Полтавської області підтвердив відомий факт, що із збільшенням діаметра металевих труб параметр потоку відмов зменшується.

2. Безвідмовність металевих водопровідних труб в 9...35 разів вища за вимоги, які вказані в «Правилах надання послуг» [14], але ремонтпридатність у 2,3...2,6 рази нижча за вимоги ДБН В.2.5–74:2013 [15].

## Список літератури

1. *Гіроль М.М.* Ефективність систем водопостачання України як фактор національної безпеки держави / М.М. Гіроль, Г.М. Семчук. Надзвичайна ситуація, №5, 2001 р.
2. *Новохатній В.Г.* Надійність функціонування подавально–розподільного комплексу систем водопостачання: дис. докт. техн. наук: спец.05.23.04 – водопостачання, каналізація / В.Г. Новохатній. Полтава: ПолтНТУ, 2012. 351 с.
3. *Гіроль М.М.* Стан водопровідних мереж України та шляхи запобігання погіршенню якості питної води.// Полімерні труби.: Інформаційно-аналітичний журнал. 2008. №21 (січень-лютий). С.7-12.
4. *Надійність* техніки. Терміни та визначення.: ДСТУ 2860-94 К.: Держстандарт України, 1995. 45 с.
5. *Новохатній В.Г.* Надійність водоводов систем водоснабження/ В.Г. Новохатній, С.О. Костенко// MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. Lublin, 2013. Vol. 15, №6. p.101–108.
6. *Ткачук О. А.* Удосконалення систем подачі та розподілення води населених пунктів / О. А. Ткачук. Рівне : НУВГП, 2008. 301 с.
7. *Хоружий П. Д.* Ресурсозберігаючі технології водопостачання / П. Д. Хоружий, Т. П. Хомутецька, В. П. Хоружий. К. : Аграрна наука, 2008. 534 с.
8. *Hotłoś H.* Analisa strat wody w systemach wodociagowych // Ochrona Srodowiska. 2003. №1. S. 17 – 24
9. *Piechurski F.* Straty wody i sposoby ich obnizania // Ochrona Srodowiska. 2006: №2. S. 20–23.
10. *Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.* Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2005. s. 1-178, 2005.
11. *Rak J.* Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. Komitet Inzynierii Srodowiska PAN. T. 28. Lublin, 2005. S. 1 – 215.
12. *ГОСТ 11.005-74.* Правила определения оценок и доверительных границ для параметров экспоненциального распределения и распределения Пуассона. М.: Издательство стандартов, 1974. 29 с.
13. *Новохатній В.Г.* Ремонтпридатність металевих водопровідних труб / В.Г. Новохатній, О.В. Матяш // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. пр. Вип.№2 (80). Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. С. 254 – 257.
14. *Правила* надання послуг з централізованого опалення, постачання холодної та гарячої води і водовідведення / Постанова Кабінету Міністрів України від 21 липня 2005р. №630.
15. *Водопостачання.* Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування: ДБН В.2.5–74:2013 [Чинний від 2014–01–01]. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово–комунального господарства України, 2013. 281 с. (Національні стандарти України).

*Стаття надійшла до редакції 20.11.17*

В.Г. МИХАЙЛЕНКО, кандидат технічних наук

О.В. АНТОНОВ

О.І. ЛУК'ЯНОВА

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАНУ, м. Харків

## **ЕЛЕКТРОМЕМБРАННЕ ПОМ'ЯКШЕННЯ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ ТЕПЛОМЕРЕЖ**

*Викладено розрахунок виходу за струмом у процесі електромембранного пом'якшення води з катіонообмінною мембраною гідрофільного типу при використанні інертного аноду. Отриманні експериментальні результати підтвердили, що вихід за струмом при одержанні NaOH залежить лише від густини струму та концентрації NaOH у католіті. Це дозволить розраховувати вихід за струмом при електромембранному пом'якшенні води для живлення тепломереж.*

**Ключові слова:** електромембранне пом'якшення, вихід за струмом; масоперенос крізь мембрану, одержання NaOH; водопідготовка для тепломереж.

*Изложен расчёт выхода по току в процессе електромембранного умягчения воды с катионообменной мембраной гидрофильного типа при использовании инертного анода. Полученные экспериментальные данные подтвердили, что выход по току при получении NaOH зависит только от плотности тока и концентрации NaOH в католите. Это позволит рассчитывать выход по току при електромембранном умягчении воды для питания теплосетей.*

**Ключевые слова:** електромембранное умягчение, выход по току, масоперенос сквозь мембрану, получение NaOH, водоподготовка для тепломереж.

*The article describes the calculation of the current output in the process of electromembrane water softening with a hydrophilic type cation-exchange membrane when using an inert anode. The obtained experimental data confirmed that the current yield in the preparation of NaOH depends only on the current density and NaOH concentration in the catholyte. This will allow to calculate the current output by using electromembrane water softening for power supply of heating systems.*

**Key words:** electromembrane softening, current output, mass transfer through the membrane, production of NaOH, water treatment for heat management.

До сьогодні у підготовці води для тепломереж застосовують реагентне пом'якшення води содово-вапняним шляхом. Проте, цей процес не дозволяє досягти потрібної глибини вилучення солей жорсткості та лужності. Тому воду, попередньо пом'якшену реагентним шляхом, допом'якшують натрій-катіонуванням [1, 477 – 481].

Відомо, що натрій-катіонування супроводжується утворенням значної кількості стічних вод з мінералізацією 35...50 г/дм<sup>3</sup>. Зазвичай ці води скидаються у шламонакопичувачі, і в паводковий період зрештою у поверхневі водойми. Кількість таких стоків залежить від залишкової жорсткості води після содово-вапняної обробки, яка становить 2...3 мг-екв/дм<sup>3</sup>, а за самих сприятливих умов не є нижчою за 1,8 мг-екв/дм<sup>3</sup>[2, 12 – 15].

У 80-х роках минулого століття В.М Роговым зі співавторами проводилися експерименти з електрохімічної корекції властивостей води [3]. Показано, що даний процес дозволяє вилучати солі жорсткості у декілька разів глибше, ніж звичайна реагентна обробка. Проте, ці дослідження не вийшли за межі лабораторії внаслідок відсутності недорогих стійких анодів та низької ефективності використання струму, оскільки аноліт та католіт розділялися нейтральними діафрагмами.

Раніше нами було розроблено технологію отримання стійкого аноду, що не містить благородних металів та їх сполук [4]. Метою цього дослідження є отримання та експериментальне підтвердження математичної моделі залежності виходу за струмом (далі ВС) від параметрів процесу та режимів електролізу. Для цього були поставлені експерименти з використанням модельної системи – розчинів гідрокарбонату та карбонату натрію, оскільки рухливості гідрокарбонат- і хлорид-іонів з одного боку, та карбонат- і сульфат-іонів з іншого є близькими. [5, 74 - 78].

Для розрахунків процесу електромембранного пом'якшення води з катіонообмінною мембраною гідрофільного типу (МК-40, СМІ-9001 і т. ін) бажано розробити узагальнений спосіб розрахунку ВС NaOH в залежності від густини струму і концентрацій аноліта і католіта. Зроблено спробу визначити вид функції, що апроксимує взаємозв'язок зазначених величин, ґрунтуючись на уявленнях про механізм перенесення іонів через мембрану.

Прийнято наступні припущення:

- при відношенні густини струму на мембрані до концентрації їдкою натру в католіті, що не перевищує 1000 А·м<sup>-2</sup>/(г-екв·дм<sup>-3</sup>), дифузійне перенапруження з катодного боку катіонообмінної мембрани мізерне, і концентрація гідроксил-іонів у поверхні мембрани дорівнює їх концентрації в обсязі католіта;

- рухливість натрій-іонів у фазі мембрани не залежить від концентрації їдкою натру в фазі розчину, оскільки обмінна ємність мембрани набагато більше концентрації розчинів;

- концентрація гідроксил-іонів у фазі мембрани біля поверхні, що звернена до аноду, дорівнює нулю;
- концентрація карбонат-іонів у фазі мембрани біля поверхні, що звернена до катоду, дорівнює нулю;
- концентрації компонентів за товщиною мембрани змінюються лінійно;
- умовне число перенесення гідроксил-іонів у фазі мембрани, аналогічне такому для розчину NaOH, не залежить від концентрації NaOH в зовнішньому розчині і дорівнює числу перенесення гідроксил-іонів в розчині NaOH.

$$\bar{t}_{OH^-} = \frac{\bar{U}_{OH^-}}{U_{OH^-} + U_{Na^+}}, \quad (1)$$

де  $\bar{t}_{OH^-}$  – число переносу  $OH^-$ -іонів у фазі мембрани;  $\bar{U}_{OH^-}$  – рухливість іонів  $OH^-$  у фазі мембрани,  $m^2/(B \cdot c)$ ;  $U_{OH^-}$ ;  $U_{Na^+}$  – рухливість іонів  $OH^-$  и  $Na^+$  в розчині,  $m^2/(B \cdot c)$ .

З урахуванням прийнятих припущень кількість NaOH, що утворюється в одиницю часу, дорівнює

$$g_{NaOH} = g_{Na^+} + g_{CO_3^{2-}}, \quad (2)$$

де  $g_{Na^+}$ ,  $g_{CO_3^{2-}}$ ,  $g_{NaOH}$  – кількість відповідних сполук, що переносяться за одиницю часу, г-екв/с.

Кількості іонів  $Na^+$  і  $CO_3^{2-}$ , які переносяться за одиницю часу, складуть

$$g_{Na^+} = \frac{I_{Na^+}}{F}, \quad (3)$$

$$g_{CO_3^{2-}} = \frac{I_{CO_3^{2-}}}{F}, \quad (4)$$

де  $I_{Na^+}$ ,  $I_{CO_3^{2-}}$  – сила струму, що переноситься відповідними іонами, А;  $F$  – число Фарадея, 96500 Кл/г-екв.

Сила корисного струму в цьому випадку складе

$$F \cdot (g_{Na^+} + g_{CO_3^{2-}}) = I_{Na^+} + I_{CO_3^{2-}}. \quad (5)$$

Оскільки

$$I = I_{CO_3^{2-}} + I_{Na^+} + I_{OH^-}, \quad (6)$$

то коефіцієнт ефективності використання струму на утворення NaOH дорівнює

$$\theta = \frac{I_{Na^+} + I_{CO_3^{2-}}}{I} = \frac{I - I_{OH^-}}{I}, \quad (7)$$

де  $I$  – загальна сила струму, А.

Враховуючи рівняння Доннана на границі розділу розчин/мембрана

$$\bar{C}_{OH^-} = C_{OH^-}^2 \cdot \frac{\gamma}{k \cdot \bar{\gamma} \cdot \delta}. \quad (8)$$

Оскільки величина комплексу  $\frac{\gamma}{k \cdot \bar{\gamma} \cdot \delta} (K_2)$  не є постійною і змінюється при зміні концентрації, то зазвичай співвідношення між концентраціями електроліту в розчині і мембрані описують емпіричною залежністю, подібною до залежності (8), але з показником ступеня при концентрації електроліту в розчині рівним  $n$ , причому  $1 < n < 2$ .

У нашому випадку

$$\bar{C}_{OH^-} = K_2 \cdot C_{OH^-}^n. \quad (9)$$

Тоді струм, викликаний перенесенням іонів  $OH^-$  в мембрані, дорівнює

$$I_{OH^-} = (I - I_0) \cdot \frac{\bar{C}_{OH^-} \cdot \bar{U}_{OH^-}}{\bar{C}_{OH^-} \cdot \bar{U}_{OH^-} + (\bar{C}_{OH^-} + \gamma) \cdot \bar{U}_{Na^+}} + \bar{D}_{OH^-} \cdot \frac{f}{l_m} \cdot \bar{C}_{OH^-}, \quad (10)$$

де  $I_{OH^-}$  – сила струму, що переноситься  $OH^-$ -іонами, А;  $\bar{D}_{OH^-}$  – коефіцієнт дифузії  $OH^-$  іонів,  $m^2/c$ ;  $f$  – площа мембрани,  $m^2$ ;  $l_m$  – товщина мембрани, м.

Сила дифузійного струму дорівнює

$$I_d = f \cdot \left( \frac{dC_{Na^+}}{dl_m} \cdot \bar{D}_{Na^+} - \frac{dC_{OH^-}}{dl_m} \cdot \bar{D}_{OH^-} - \frac{dC_{CO_3^{2-}}}{dl_m} \cdot \bar{D}_{CO_3^{2-}} \right), \quad (11)$$

де  $\bar{D}_{OH^-}$ ;  $\bar{D}_{Na^+}$ ;  $\bar{D}_{CO_3^{2-}}$  – коефіцієнти дифузії  $OH^-$ -,  $Na^+$ -, і  $CO_3^{2-}$  іонів, відповідно.

З допущення лінійності концентраційних профілів у мембрані

$$I_d = \frac{f}{l_m} \left[ |\overline{OH^-}| \cdot (\bar{D}_{OH^-} - \bar{D}_{Na^+}) - |\overline{CO_3^{2-}}| \cdot (\bar{D}_{CO_3^{2-}} - \bar{D}_{Na^+}) \right]. \quad (12)$$

Оскільки коефіцієнт дифузії гідроксил-іонів значно більше коефіцієнта дифузії іонів натрію, а коефіцієнти дифузії іонів натрію і карбонат-іонів – одного порядку, вираз (12) для дифузійного струму можна спростити:

$$I_d \approx \frac{f}{l_m} \cdot \bar{C}_{OH^-} \cdot (\bar{D}_{OH^-} - \bar{D}_{Na^+}). \quad (13)$$

Підставляючи значення коефіцієнтів дифузії іонів отримуємо з (12)

$$I_d = \frac{f}{l_m} \cdot \frac{\alpha \cdot T}{F^2} \cdot \bar{U}_{Na^+} \cdot C_{OH^-} \cdot \frac{2 \cdot \bar{t}_{OH^-} - 1}{1 - \bar{t}_{OH^-}} = f \cdot \frac{C_{OH^-}}{K_3} \cdot \frac{2 \cdot \bar{t}_{OH^-} - 1}{2 \cdot (1 - \bar{t}_{OH^-})}, \quad (14)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт, що дорівнює

$$K_3 = \frac{l_m \cdot F^2}{2 \bar{U}_{Na^+} \cdot \alpha \cdot T}. \quad (15)$$

Підставляючи величину  $I_d$  з (14) у (10), отримуємо формулу для ВС:

$$\theta = 1 - \frac{4 \cdot \frac{K_2}{\sigma} \cdot C_{\text{OH}^-}^n + 2 \cdot \frac{K_2}{K_3} \cdot \frac{C_{\text{OH}^-}^n}{i} \cdot (2 \cdot \frac{K_2}{\sigma} \cdot C_{\text{OH}^-}^n + 1)}{5 \cdot \frac{K_2}{\sigma} \cdot C_{\text{OH}^-}^n + 1} \quad (16)$$

Відповідно до отриманого рівняння (16) була проведена математична обробка експериментально визначених ВС. Встановлено, що дані дослідів задовільно апроксимуються формулою (3.30) при значеннях  $n = 1$ ;  $\frac{K_2}{\sigma} = 0,03348$ ;  $\frac{2 \cdot K_2}{K_3} = 20,53$  (табл. 1).

Таким чином, для розрахунків процесу електролізу з катіонообмінною мембраною природних вод отримана наступна залежність, яка визначає коефіцієнт ефективності використання струму при отриманні NaOH з солей натрію, що містяться у воді

$$\theta = 1 - \frac{0,1339 \cdot C_{\text{OH}^-} + 20,53 \cdot \frac{C_{\text{OH}^-}}{i} \cdot (0,067 \cdot C_{\text{OH}^-} + 1)}{0,1674 \cdot C_{\text{OH}^-} + 1}, \quad (17)$$

де  $C_{\text{OH}^-}$  – концентрація  $\text{OH}^-$  іонів, г-екв/м<sup>3</sup>;  $i$  – густина струму, А/м<sup>2</sup>.

У табл. 1 наведені значення ВС при електролітичній регенерації NaOH в електролізі модельного розчину, що містить карбонат і гідрокарбонат натрію, а також перенесення води до католіту.

З цієї таблиці випливає, що ВС істотно знижується зі збільшенням концентрації католіту і дещо зростає при підвищенні густини струму при рівній концентрації католіту. У той же час від ступеня гідрокарбонізації і загальної лужності води в анодній камері, ВС практично не залежить.

Таблиця 1

**ВС по NaOH і перенесення води**

Концентрації <sup>1)</sup>			Ступінь гідрокарбонізації $\alpha$ , %	Густи-на струму, А/м <sup>2</sup>	ВС $\theta$ , %	ВС, розрахований за формулою (17), %	Перенос води, моль/ Моль NaOH
католіту, г-екв/дм <sup>3</sup>		аноліту, г-екв/дм <sup>3</sup>					
$C_{\text{NaOH}}$	$C_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$	$\text{Na}^+$					
1	2	3	4	5	6	7	8
1,214	0,019	0,831	73,2	1039	82,6	80,95	5,4

<sup>1)</sup>Концентрації католіту та аноліту визначені як середнє арифметичне початкового та кінцевого показників.



1,219	0,019	0,828	71,4	520	81,1	80,3	5,4
1,216	0,016	0,811	71,0	208	80,4	85,2	8,3
0,608	0,014	0,431	75,4	665	88,3	85,7	6,4
00,602	0,013	0,436	76,0	333	86,7	84,1	6,2
0,598	0,013	0,442	76,8	137	84,3	84,3	6,4
0,247	0,008	0,155	74,5	317	91,2	87,6	3,8
0,247	0,008	0,151	76,7	217	91,7	88,95	3,5
0,248	0,009	0,155	75,4	69,6	90,7	91,6	4,2
0,124	0,008	0,0754	77,2	173	97,3	97,3	не
0,124	0,008	0,0758	76,3	32,2	97,3	99,25	- // -
0,122	0,008	0,0784	74,3	43,1	95,2	98,1	- // -
0,0596	0,0054	0,0372	77,6	83,2	98,7	99,7	- // -
0,0585	0,0055	0,0373	78,0	49,9	96,8	96,8	- // -
0,0587	0,0053	0,0374	79,5	23,3	96,8	98,7	- // -
2,903	0,038	0,938	70,0	1039	69,3	69,3	8,3
2,832	0,038	0,996	72,5	208	53,3	54,9	12,7
1,540	0,018	0,836	74,5	1039	76,0	71,4	6,4
0,792	0,021	0,835	74,1	208	82,3	81,5	4,8
1,522	0,022	0,860	75,2	208	71,9	73,3	7,6
1,300	0,017	0,1199	66,3	195	76,4	79,5	не
1,273	0,017	0,1401	45,2	43,1	26,5	22,3	- // -
0,570	0,0096	0,0943	75,4	173	83,4	80,1	- // -
0,567	0,0093	0,1006	66,9	43,1	67,5	67,5	- // -
0,211	0,0058	0,0796	74,9	173	95,1	95,1	- // -
0,211	0,0054	0,0838	77,5	43,1	90,2	92,9	- // -
2,901	0,035	0,937	72,4	1039	68,7	68,0	7,0
2,805	0,040	1,0124	73,2	208	48,2	44,8	13,1
1,547	0,013	0,877	74,7	1039	80,9	80,9	5,9
1,534	0,013	0,890	75,7	208	73,8	77,5	6,0
0,794	0,022	0,831	75,8	1039	85,0	80,75	4,6
0,801	0,024	0,842	73,5	208	81,4	79,8	4,0
1,282	0,016	0,1307	58,7	195	74,9	75,6	не
1,263	0,015	0,1509	37,2	43,1	25,7	20,6	- // -
0,564	0,011	0,0984	68,2	173	85,2	83,5	- // -

0,555	0,010	0,1039	72,5	43,1	71,3	74,9	- // -
0,212	0,0059	0,0747	74,6	173	92,1	89,3	- // -
0,208	0,0061	0,0770	74,0	43,1	84,8	81,4	- // -
1,210	0,013	0,776	33,2	1039	80,3	76,3	5,6
1,208	0,014	0,682	95,2	1039	80,5	76,5	6,7
0,032	0,002	0,036	95,8	48,3	97,5	98,2	не
0,032	0,002	0,036	95,8	22,5	97,2	96,7	не визн.
0,011	0,000	0,036	97,8	48,3	101,2	99,4	не визн.
0,011	0,00	0,036	97,8	22,5	96,9	98,8	не визн.

При проведенні експериментів не виявлено також суттєвої залежності питомих переносів води і іонів  $\text{CO}_3^{2-}$  від параметрів процесу. Середнє значення перенесення води дорівнювало 6,43 моль/моль  $\text{NaOH}$ . Розрахунок перенесення  $\text{CO}_3^{2-}$  до католіту проти катіонообмінної мембрани, виконаний за різниці початкових і кінцевих кількостей даного іона, показав, що середнє значення перенесення склало  $0,616 \cdot 10^{-3}$  моль/моль  $\text{NaOH}$ , тобто перенесенням іонів  $\text{CO}_3^{2-}$  до католіту практично можна знехтувати.

**Висновок.** Результати розрахунку за формулою (17) задовільно збігаються з експериментальними даними. ВС при отриманні  $\text{NaOH}$  залежить лише від густини струму та концентрації  $\text{NaOH}$  у католіті. Отримана залежність (17) дозволяє з достатньою точністю розраховувати ВС у процесі пом'якшення води електролізом з катіонообмінною мембраною.

#### Список літератури

1. Фрог Б.Н., Первов А.Г. Водоподготовка. М.: Изд-во «АСВ», 2015. 255 с.
2. Чайковский Г.П. Умягчение воды на промышленных предприятиях: Учеб. пособие/ Г.П. Чайковский. Хабаровск: ДВГУПС, 2005. 127 с.
3. Рогов В.М. Электрохимическая технология изменения свойств воды / В.М. Рогов, В.Л. Филипчук. Львов: Выща. шк., 1989 125с.
4. Антонов А.В., Михайленко В.Г., Юрченко В.А. Перспективы эксплуатации мембранного оборудования в водоочистных системах // Науковий вісник будівництва. № 3(81), 2015. С. 121–124
5. Д. Добш. Электрохимические константы. М.: Мир, 1980. 365 с.

Стаття надійшла до редакції 16.11.17

С.І. МОВЧАН, кандидат технічних наук  
Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТЕЧІЇ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ В ЗАМКНеноМУ КОНТУРІ АПАРАТІВ НАПІРНОЇ ФЛОТАЦІЇ**

*З використанням математичного апарату розглянуто закономірності та обґрунтовано умови руху водного потоку у вертикальній площині в замкненому контурі апаратів напірної флотації, які визначають ефективність роботи водоочисного обладнання систем оборотного водопостачання промислових підприємств.*

**Ключові слова:** водний потік, замкнений контур, апарати електрофлотокоагуляції, напірна флотація, дифузія, оборотне водопостачання, рух рідини.

*С использованием математического аппарата рассмотрены закономерности и обоснованы условия движения водного потока в вертикальной плоскости замкнутого контура аппаратов напорной флотации, определяющие эффективность работы водоочистного оборудования систем оборотного водоснабжения промышленных предприятий.*

**Ключевые слова:** водный поток, замкнутый контур, аппараты электрофлотокоагуляции, напорная флотация, диффузия, обратное водоснабжение, движение жидкости.

*Using the mathematical apparatus, the regularities of the motion of the water flow in the vertical plane of the closed contour of pressure flotation devices that determine the efficiency of the operation of water purification equipment of the circulating water supply systems of industrial enterprises are considered and the conditions if this motion are substantiated.*

**Key words:** water flow, closed loop, electrophotocoagulation devices, pressure flotation, diffusion, circulating water supply, fluid motion.

**Вступ.** Вода, водні ресурси – це найважливіші компоненти водогосподарського комплексу країни, який в самому широкому розумінні відіграє важливу роль у всіх сферах людської діяльності.

При здійсненні водогосподарської політики в нашій країні впродовж багатьох десятиліть вода ніколи не розглядалася як основа життєзабезпечення природних екосистем і людини, не враховувався і не

прогнозувався екологічний стан водних систем та їхній вплив на біорізноманіття [1, 3].

Згідно Постанови Кабінету Міністрів України “Про затвердження критеріїв...” водоочисне обладнання повинно відповідати наступним головним критеріям: технічним і еколого – економічним [2, 2]. В тому числі, такий оцінці відповідають апарати напірної флотації систем оборотного водопостачання.

У технології систем оборотного водопостачання технологічне обладнання з потужністю 1...10 м<sup>3</sup>/год. займає відповідне місце внаслідок компактності, надійності та ефективності роботи в системах промислового водопостачання.

Постановка проблеми. Водний потік, який рухається в замкненому контурі апаратів напірної флотації, утворює складний процес. Крім сил, які діють у вертикальній та горизонтальній площинах, водний потік на своєму шляху пересилює опір сил у вертикальній площині.

Розташування сил, діючих на кожну окрему частинку в рідині, що рухається як у вертикальній так і горизонтальній площин ах, наведена на рис. 1 [3, 11].

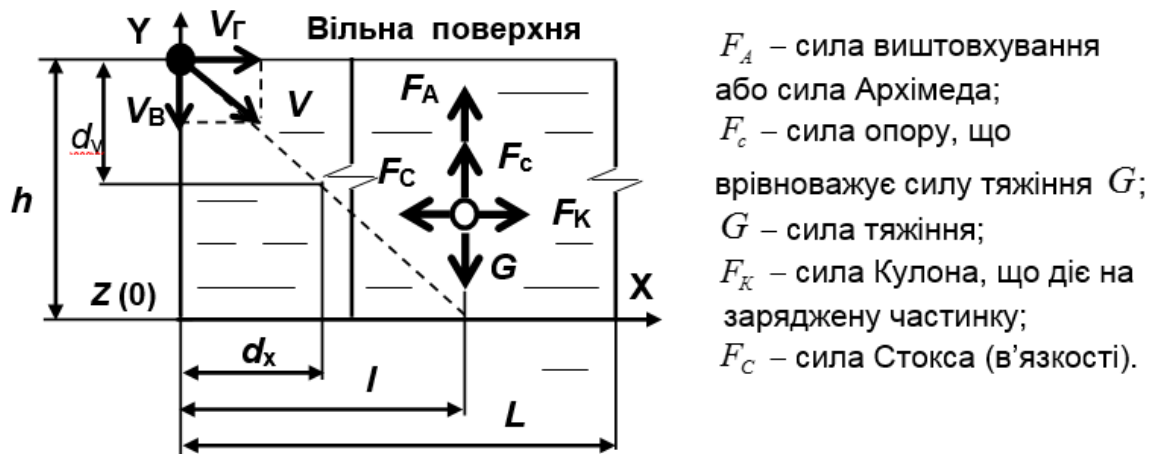


Рис. 1. Діаграма сил, діючих на частинку, що вільно осаджується і рухається в рідинному середовищі

Згідно з дослідженнями роботи апаратів напірної флотації отримано оптимальне співвідношення між їх діаметром та висотою, кількістю ступенів (камер) оброблення стічних вод тощо. Визначальним фактором дослідження водного потоку є наявність умов забезпечення ефективної роботи водоочисного обладнання.

**Актуальність обраного напрямку досліджень.** Згідно динаміки руху безперервного середовища, рух рідини вважається заданим у разі, коли в будь – який момент часу  $t$  можливо визначити (вирахувати із заданою точністю) поле швидкостей частинок середовища  $V(x, t)$  в будь – якій точці  $x$  об'єму. Крім того, поля швидкостей визначаються іншими величинами, що

характеризують стан середовища: густина  $\rho(x, t)$ , тиск  $P(x, t)$ , температура  $T(x, t)$  та інш. (рис.2) [4, 11].



Рис. 2. Блок – схема математичного опису руху суцільного рідинного середовища

Тому розроблення математичних моделей для систем складного руху висхідних і низхідних водних потоків є актуальним завданням в роботі напірних систем оброблення стічних вод.

Актуальність теми підтверджується тим, що багаторічний досвід у галузі промислового водопостачання ставить перед науковцями завдання пошуку більш ефективних та надійних шляхів підвищення якості оброблення стічних вод.

Правильний вибір моделі процесу часто забезпечує позитивне рішення поставлених задач. Теоретичними передумовами для створення математичної моделі послужили дослідження в галузі вивчення процесів та явищ, що відбуваються в процесах електрофорезу і седиментації [5, 4], інтенсифікації систем промислового водопостачання [6, 3], а також окремих елементів та складових одиниць, що входять до її складу [10, 8; 11, 7-8].

**Аналіз конструктивних рішень, що відповідають напряму досліджень.** Конструктивні виконання апаратів напірної флотації з круглим перерізом і вертикальним розташуванням набули широкого розповсюдження в системах багаторазового використання оброблених стічних вод промислових підприємств.

Апарат для оброблення стічних вод гальванічних відділень складається з корпусу апарату, вертикальних колекторних труб із засипним анодним матеріалом, камер реакції, вертикально розташованих у вигляді шестигранної труби. Нижня частина корпусу апарату має конусну форму, в якому рух через них здійснюється висхідними й низхідними потоками [5, 3].

Апарат оброблення стічних вод включає нижню конусну частина корпусу електрокоагулятора, яка складається з трьох секцій у вертикальній площині, діелектричної труби з анодом і катодом та вертикально розташованих перфорованих стаканів з анодом й катодом із електрохімічно розчинного засипного матеріалу [6, 3-4].

Підведення стічної води на оброблення в трисекційному електрокоагуляторі відбувається до вертикально розташованих перфорованих ємностей з анодом і катодом та колекторних труб із електрохімічно розчинного засипного матеріалу [7, 4].

В електрокоагуляторі камери реакції розташовані по колу між внутрішніми та зовнішніми коаксіальні ємності [8, 3-4].

Наведені конструктивні рішення відрізняє вертикальне розташування корпусу апарату, насиченість електродних систем в його середині, що розширює функціональні можливості водоочисного обладнання з одного боку, а з іншого – значна кількість гідравлічних опорів, що впливають на суцільність потоку в обох напрямках.

Шляхи вирішення конкретної задачі, пов'язаної із розробленням математичної моделі, коли має місце невстановлений рух нестисненої в'язкої рідини вирішуються наближеними методами [4, 111].

**Метою досліджень** є встановлення залежностей, які визначають параметри руху в'язкої рідини всередині апарату напірної флотації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Визначити умови дії сил гідродинамічної течії в'язкої рідини у вертикальній поверхні замкнених контурів апаратів напірної флотації.
2. Встановити зв'язок між потужністю водоочисного обладнання і головними параметрами роботи водоочисного обладнання.

#### **Математичне оформлення і гідродинамічні аспекти руху водного потоку у вертикальній площині**

Основні рівняння і залежності, які використовуються для математичного моделювання процесів в системі водопостачання:

- рівняння нерозривності потоку:

$$Q = \omega \cdot v, \quad (1)$$

- рівняння траєкторії руху частинки:

$$\frac{\partial z}{v \pm u_w} = \frac{\partial z}{u + u_w \cdot \frac{\omega^2 \cdot r}{g}}, \quad (2)$$

де  $u_w$  – гідравлічна крупність, м/с;

Закон Фіка строго виконується лише для бінарних сумішей у разі відсутності всіх градієнтів, крім градієнтів концентрації [Кейс 9, с. 351].

Розроблені оптико-механічні системи визначення гідромеханічних параметрів частинок водних розчинів дозволяють визначати гідромеханічні параметри частинок водних розчинів [10, 9; 11, 11].

Розподіл іонів у дифузній частині подвійного електричного шару описується теорією Гуї–Чепмена, яка розглядає тільки електростатичну взаємодію й моделює іони зарядженими точками [12, 194].

У теорії електрофорезу, розробленої Смолуховським и Гюккелем, відповідно якої рух частинки в електричному полі розглядається як результат

дії на її поверхневий заряд сили Кулона з боку електричного поля і сили в'язкості у горизонтальній площині. А у вертикальній площині: силі тяжіння й в'язкості та силі Архімеда. Таке розташування сил та їх дія в горизонтальній та вертикальній площинах стало основою проведених досліджень [13, 42-44].

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_\kappa + \vec{F}_c = 0 \\ \vec{F}_m + \vec{F}_A + \vec{F}_c = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

з урахуванням вищезначених сил маємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_\kappa = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_o \cdot r \cdot \xi \cdot E = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot V_\Gamma = F_c \quad (4.1) \\ \vec{F} = m \cdot \vec{g} = \rho \cdot V \cdot \vec{g} = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{8} \cdot \vec{g} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot D^3 \cdot \rho \cdot \vec{g} \quad (4.2) \\ \vec{F}_A = -m_1 \cdot \vec{g} = -\rho_1 \cdot V \cdot \vec{g} = -\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot D^3 \cdot \rho_1 \cdot \vec{g} \quad (4.3) \\ \vec{F}_c = -6 \cdot \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \eta \cdot \vec{V}_B \quad (4.4) \end{array} \right.$$

Дослідження руху частинок домішок водних розчинів висхідними і низхідними потоками дозволили встановити, що сила опору (рис. 3), яка обумовлена тертям сил в'язкості, відповідно закону Стокса, згідно формули (4.4) для сферичних частинок дорівнює:

$$F_{con} = 6\pi\alpha\eta v, \quad (5)$$

де  $F_{con}$  – сила опору руху частинки;  $\eta$  – коефіцієнт абсолютної в'язкості;  $\alpha$  – радіус частинки;  $v$  – швидкість частинки відносно рідини.

Внаслідок того, що  $F_{con}$  залежить від швидкості частинки, зануреної в рідину, на котру діє ще й сила тяжіння  $F_t = mg$  ( $m$  – маса частинки,  $g$  – прискорення вільного падіння) і сила Архімеда  $F_a = m_1g$  ( $m_1$  – маса рідини, витисненою), рухається на початку з прискоренням, поки швидкість  $V$  не досягне величини, при котрій сума сил, що діє на частинку, не стане дорівнювати нулю, тобто має місце:

$$mg = F_a + F_{con}, \quad (6)$$

Рівняння для надходження швидкості  $V_1$  – рівномірного руху твердої частинки в рідині вдовж вертикальної осі, використовуючи рівність (6) і, виразивши масу частинки через густину  $\rho$ , радіус частинки через  $a$  та масу рідини, витиснену через густину  $\rho_1$ , отримаємо:

$$\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \rho \cdot g \cdot a^3 = \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \rho_1 \cdot g \cdot a^3 + 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a \cdot V_1, \quad (7)$$

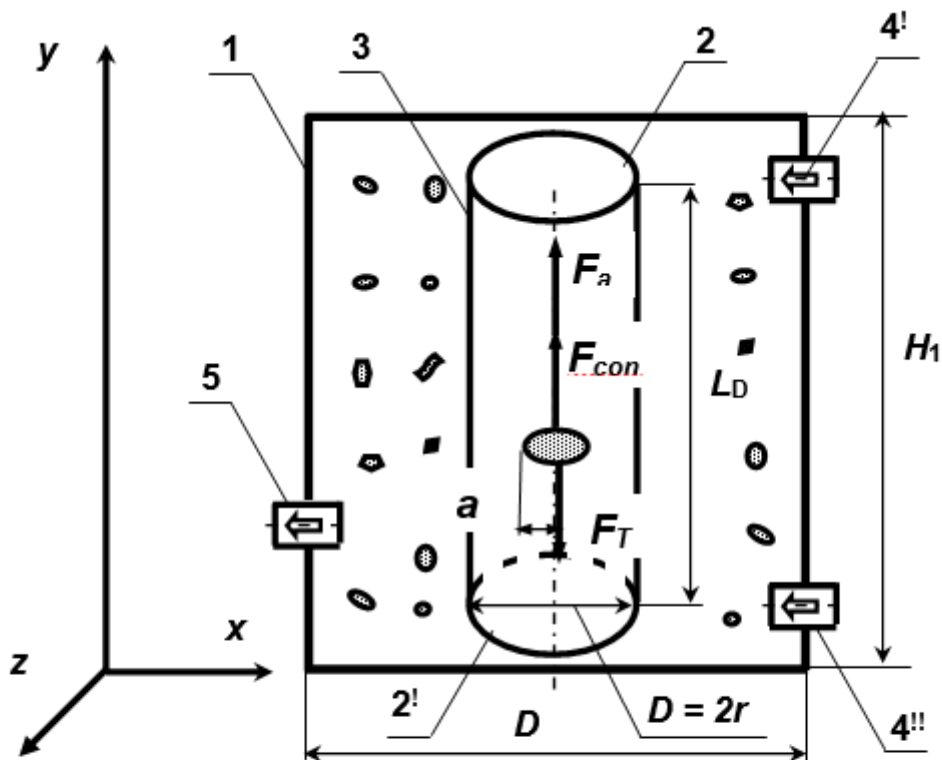


Рис. 3. Контрольний об'єм в середині вертикально розташованого апарату: 1 – корпус апарату; 2, 2' – горизонтальна, відповідно верхня та нижня грані вертикального циліндра; 3 – бокова поверхня циліндра; 4'...4'' – трубопроводи підведення стічних вод для оброблення; 5 – трубопровід відведення стічних вод після оброблення

Звідси швидкість  $V_1$  рівномірного руху частинки домішок водних розчинів в рідині вздовж вертикальної осі визначається за формулою:

$$V_1 = \frac{2 \cdot (\rho - \rho_1) \cdot g \cdot a^2}{9 \cdot \eta} \quad (8)$$

Наведена формула (8) справедлива для умов встановленого руху частинок достатньо великих розмірів, які знаходяться в умовах малої концентрації.

Час осадження частинки на поверхні даного радіуса можливо знайти, оцінивши попередньо час розгону частинки при її зануренні в рідині на глибину  $h$  (рис. 3)

Рівняння руху частинки в рідині при  $g \neq 0$  має вигляд:

$$mz'' = m_1g - mg - 6\pi\alpha\eta z' \quad (9)$$

де  $z'$  и  $z''$  – перша і друга похідні  $z(t)$  по часу.

Поділивши (9) на  $m$  і виразивши маси частинки і рідини через їх густину (частинки і рідини), отримуємо рівняння для  $z(t)$  з початковими умовами:

$$z'' + az = -\beta, \quad z(0) = H, \quad z(t) = 0, \quad (10)$$

в якому введені позначення:



$$\alpha = \frac{9 \cdot \eta}{2 \cdot a^2 \cdot \rho},$$

$$\beta = \frac{g \cdot (\rho - \rho_1)}{\rho},$$
(11)

Виконавши заміну  $z' = V$ ,  $z'' = V'$ , отримаємо диференційне рівняння для знаходження  $V(t)$ :

$$V' + \alpha V = -\beta, \quad V(0) = 0, \quad (12)$$

Рішення цього рівняння має наступний вигляд:

$$V(t) = -V_1(1 - e^{-\alpha t}), \quad (13)$$

Інтегрування рівняння (13) отримаємо з урахуванням початкових умов залежність координати  $z$  частинки від часу:

$$z_{(t)} = H - V_1 \left[ t - \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \right], \quad (14)$$

Час розгону  $t$ , швидкість  $V_1$ , і шлях  $h$ , що пройшла частинка для досягнення цієї швидкості можливо визначити, виходячи із кінетичного аналізу. Можливо вважати, що час розгону  $t$ , це час, за який пройшла частинка для досягнення швидкості, яка відрізняється від  $V_1$  на 1% тобто:

$$\frac{V_1 - V}{V_1} = e^{-\alpha t} = 0.01, \quad (15)$$

тоді,

$$\tau = \frac{2 \ln 10}{\alpha} = \frac{4.6}{\alpha} \cong \frac{\rho}{\eta} \alpha^2, \quad (16)$$

Шлях  $h$ , що пройшла частинка за цей же час, отримаємо із (14) з урахуванням (15) та (16):

$$h = H - z_{(t)} = V_1 \left[ \tau - \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \tau}) \right], \quad (17)$$

Отримані результати досліджень [14, 134] доводять, що час руху до швидкості  $V_1$  для більших за розмірами частинок  $d > 50 \cdot 10^{-6}$  м, який відбувається у більш в'язких рідинах (розчинах масел і нафтопродуктах) 0,03-0,05 с. Шлях, що пройшла частинка, дуже незначний. Тому при визначенні часу осадження із значною товщею шару водного розчину  $H$  (рис. 3) можливо використовувати лише величиною швидкості  $V_1$  із рівняння (8). Внаслідок чого час осаджування визначається за формулою:

$$t_0 = \frac{H}{V_1}, \quad (18)$$

Таким чином, обираючи габаритні розміри апаратів напірної флотації (висоту  $H$ , діаметр  $D$ ), умовами його роботи і розмірами частинок водних розчинів (ефективний діаметр  $D_{\text{еф}}$ ), які необхідно видалити із стічних вод та кількість ступенів оброблення стічних вод (коаксіальних ємностей  $n$ ), можливо визначити потужність водоочисного обладнання. [11, 1-8].

Остання обставина є необхідною умовою при проектуванні та експлуатації водоочисного обладнання в системах оборотного водопостачання [15, 1-10].

Задавшись величиною  $H$  – висотою апарату, вимогами до очищених стічних вод (мінімальним ефективним діаметром частинок домішок водних розчинів  $D_{\text{еф}}$ ) та іншими конструктивними параметрами устаткування можливо визначити його потужність за одиницю часу.

### **Висновки та перспективи подальших розробок**

Враховуючи умови руху водного потоку у вертикальній площині, сили, що діють на частинку, доведено, що цей рух є досить складним і визначальним в роботі апаратів напірної флотації.

1. Між потужністю роботи водоочисного обладнання, розмірами частинок домішок водних розчинів існує залежність, яка дозволяє керувати процесами оброблення стічних вод промислових підприємств.

2. Встановлено, що для забезпечення ефективності роботи водоочисного обладнання необхідно мати на увазі швидкість руху водного потоку  $i$ , як наслідок, частинки домішок, яка залежать від густини розчину, концентрації забруднень, збільшення площини живого перерізу та об'єму апарату тощо.

### **Список літератури:**

1. *Яцик А.В.* Водні ресурси: використання, охорона, відтворення, управління: Підручник для студентів вищих навч. закладів / А.В. Яцик, Ю.М. Грищенко, Л.А. Волкова, І.А. Пашенюк. К.: Генеза, 2007. 360 с.

2. *Постанова* Кабінету Міністрів України “Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності у сфері питного водопостачання і водовідведення та визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю)” від 14 січня 2009 р. N 16 // Офіційний вісник України. 2009. N 4. Ст. 100.

3. *Куликов Н.И.* Теоретические основы очистки вод: учебное пособие / Н.И. Куликов, А.Я. Найманов, Н.П. Омельченко, В.Н. Чернышев. Донецк: Ноулидж, 2009. 298 с.

4. *Лаврентьев М.А.* Проблемы Гидродинамики и их математические модели / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат Изд. 2-е. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», М., 1977. 408 с.

5. *Патент* на корисну модель № 103688 Україна, МПК<sup>7</sup> (2015.01) C02 F103/16(2006.01). C02 F1/00. Апарат оброблення стічних вод гальванічних відділень [текст]: / С.І. Мовчан. Заявка № а 201506137; заявл. 22.06.2015, опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24.

6. *Патент* на корисну модель № 109872. Україна, МПК<sup>7</sup> (2006.01) C 02 F1/46. Апарат для оброблення стічних вод [текст]: / С.І. Мовчан. Заявка № у 2016 02900; заявл. 22. 03.2016, опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17.

7. *Патент* на корисну модель № 111868 Україна, МПК<sup>7</sup> (2006.01) C02 F1/46. Трисекційний електрокоагулятор [текст]: / С.М. Епоян, С.І. Мовчан. Заявка № у 2016 04936; заявл. 04.05.2016. Опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22.