

С.П. Висоцький, Г.В. Фаткуліна
Автомобільно-дорожній інститут ДВНЗ ДонНТУ

Накипоутворення в теплофікаційних системах

Розглянуті основні фактори які впливають на інтенсивність накипоутворення в теплофікаційних системах. Карбонат кальцію є основним накипоутворювачем. Відкладення накипу суттєво впливає на витрату палива.

утворення накипу, індукційний період, витрата палива, карбонатний індекс

Основою процесів в теплоенергетичних установках є тепло- та масообмінні процеси. Практично у всіх системах перенесення тепла в нашій країні і закордоном теплоносієм є вода. В результаті контакту поверхні нагріву з водою і в умовах змін температури і концентрації мінеральних солей або їх іонів постійно утворюються нерозчинні у воді солі жорсткості, які у вигляді твердого осаду відкладаються на тепло- або масообмінній поверхнях. З часом шар твердих відкладень ущільнюється і зміцнюється, утворюючи накип.

Утворення накипних відкладень на теплообмінних поверхнях є однією з головних проблем теплоенергетики протягом всієї історії її розвитку. Кожна доля міліметра шару накипу, що утворюється, призводить до погіршення процесу теплопередачі, до збільшення питомої витрати кількості тепла, енергоносіїв, електроенергії.

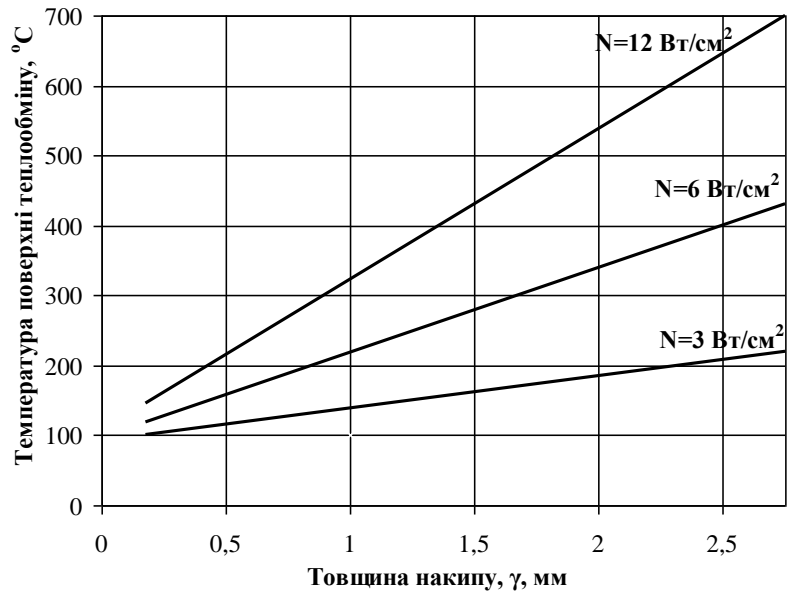
З появою накипу на внутрішній поверхні труб збільшується температура зовнішньої поверхні металу, що обігривається, через низьку теплопровідність накипу. Таким чином, накип сприяє підвищенню температури металу труб та перевитрати енергоносіїв. Залежність збільшення температури поверхні теплообміну від товщини накипу зображена на рис. 1.

Товщина відкладень в 1-2 мм розглядається як значна й температура стінок труб може зростати на кілька сотень градусів (табл. 1). Допустима величина інтенсивності відкладень для теплофікаційних систем складає $0,11 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ [1].

Утворення на внутрішній поверхні котла шару накипу товщиною всього 1 мм спричиняє перевитрату палива на 5-8%. На рис. 2 зображена залежність збільшення витрат палива від товщини накипу [3].

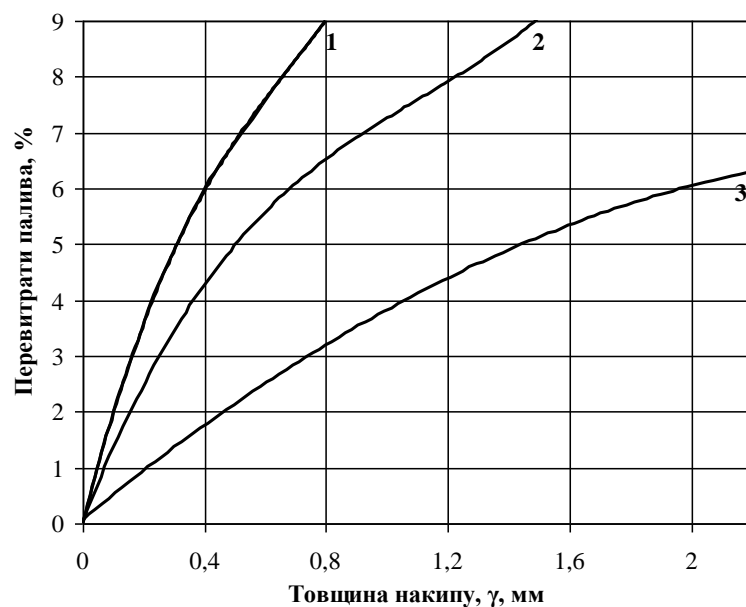
Таблиця 1. Теплопровідність відкладень

Температура зовнішньої поверхні труби, °С	410	450	560
Товщина відкладень, мм	0,11	0,17	0,28
Підвищення температури стінок через відкладення, °С	50	90	198



N – питома потужність, яка приходиться на одиницю поверхні

Рисунок 1. Залежність збільшення температури поверхні теплообміну від товщини накипу



1 – за іноземними джерелами; 2 – за даними ВТІ ім. Дзержинського; 3 – за даними А.Н. Вольського

Рисунок 2. Залежність перевитрати палива від товщини накипу

Відкладення солей жорсткості на теплообмінному обладнанні призводить до зменшення ефективності його роботи. Із часом втрати потужності можуть становити 70%.

Забруднення теплообмінних поверхонь нагрівача накипними відкладеннями не тільки знижує ефективність його роботи й вимагає періодичної зупинки для проведення очищення, але й, що найважливіше, викликає ланцюжок економічних витрат при виробництві, транспортуванні й споживанні тепла.

Для оцінки накипоутворюючої здатності води в практику організації водно-хімічного режиму систем тепlopостачання був введений нормативний показник – карбонатний індекс (I_K), який дорівнює добутку карбонатної жорсткості на загальну лужність води. При будь-якій технології водопідготовки в обробленій воді відповідно до норм правил технічної експлуатації повинен бути витриманий відповідний даній температурі підігріву води карбонатний індекс. В рис. 4 наведені нормовані значення карбонатного індексу залежно від температури підігріву води в мережевих підігрівачах і водогрійних котлах. Ці залежності карбонатного індексу I_K від температури води, що надходить на підігрів, зображені на рис. 4.

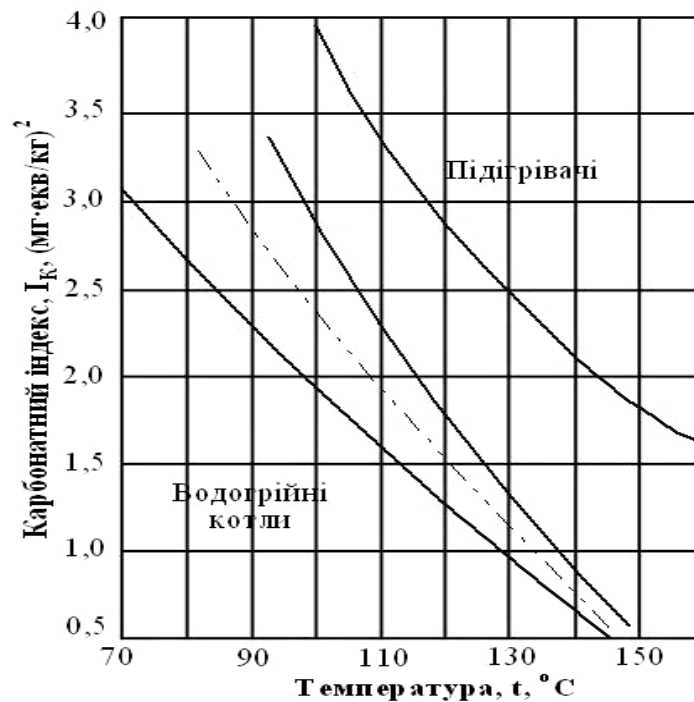


Рисунок 4. Залежність карбонатного індексу від температури (для тепломереж)

Інтенсивність накипоутворення у відкритих системах із вільним відводом вуглекислого газу, що характерно для оборотних систем охолодження, пропорційна добутку концентрацій катіонів кальцію на квадрат лужності вихідної води (рис. 5) [4].

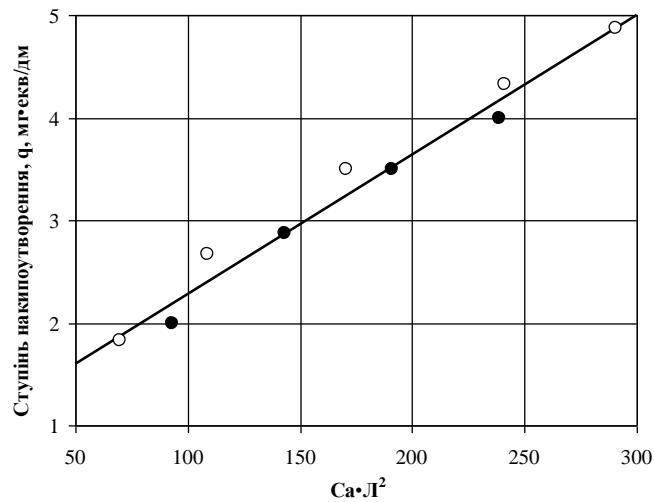


Рисунок 5. Залежність ступеню накипоутворення від концентрації добутку $\text{Ca} \cdot \text{Л}^2$

Однак для закритих систем, таких як теплові мережі, коли рівновага в системі $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2$ зрушується в праву сторону, зазначена залежність неповно описує процес накипоутворення. Це не дозволяє з достатньою точністю вибрати технологію очищення води.

На вітчизняних установках підготовки води для теплових мереж використовується в основному технологія пом'якшення води в натрій-катионітних фільтрах, при якій не видаляються накипоутворюючі аніони-гідрокарбонати. Більш доцільним є використання карбоксильних катіонітів, які дозволяють видалити як кальцій так і гідрокарбонат [4].

Основними катіонами, що містяться в природній воді, є Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ ; основними аніонами – HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- . Всі натрієві сполуки легко розчинні; високу розчинність мають і хлориди. Крім того, ці сполуки мають позитивний температурний коефіцієнт розчинності (розчинність при підвищенні температури збільшується), тому вони практично не зустрічаються в складі відкладень при температурі нагрівання води до 200°C у відсутності кипіння. Мала величина добутку розчинності характерна для MgCO_3 , CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ і CaSO_4 . Крім того, у цих сполук негативний температурний коефіцієнт розчинності й зі збільшенням температури ДР зменшується. У табл. 2 наведені величини ДР перерахованих вище солей.

Таблиця 2. Добуток розчинності основних накипоутворювачів

Температура $^\circ\text{C}$	25	50	100	150	200
$\text{ДР}(\text{CaSO}_4) \cdot 10^{-5}$ ангідрит	3,7	1,9	0,31	0,027	0,0014
$\text{ДР}(\text{MgCO}_3) \cdot 10^{-6}$	7,9	1,8	0,098	0,0052	0,003
$\text{ДР}(\text{CaCO}_3) \cdot 10^{-9}$	4,4	2,2	0,47	0,053	0,0043
$\text{ДР}(\text{Mg}(\text{OH})_2) \cdot 10^{-12}$	6,6	6,4	4,1	1,3	0,32
$\text{ДР}(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) \cdot 10^{-5}$ гіпс	2,54	2,1	1	–	–

Математична обробка експериментальних даних, представлених в табл. 2 для двох найбільш значущих з погляду накипоутворення солей карбонату кальцію і сульфату кальцію

(ангідриту) дозволила встановити наступні залежності добутків їх розчинності від температури (рис. 6).

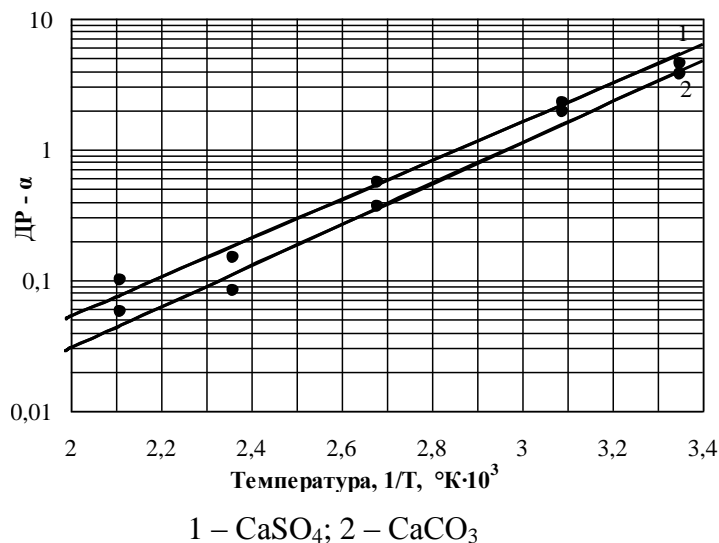


Рисунок 6. Залежність добутку розчинності від температури

Для CaSO₄: $Y = 2,17 \cdot 10^{-5} \cdot a^{\frac{3,610^3}{0}} - 0,056$; де Y=ДР; R²=0,9902.

Для CaCO₃: $Y = 5,77 \cdot 10^{-5} \cdot a^{\frac{3,410^3}{0}} - 0,095$; де R²=0,9857

Індукційний період збільшується при зміні типу кристалів, наприклад, сульфат кальцію при кристалізації може осідати в трьох різних модифікаціях.

На рис. 7 показані області стабільних станів для 3-х форм сульфату кальцію: гіпсу, напівгідрату і ангідриту. Як видно з приведених даних, ангідрит є стабільною формою при температурі більш 42°C. Напівгідрат – метастабільний при температурі зверху 98°C. Розчини напівгідрату з лишком CaSO₄·1/2H₂O переходять у форму ангідриту CaSO₄ протягом 17 годин при температурі 100°C, але при 200°C для такого ж переходу потрібний всього декілька хвилин. Гіпс є низькотемпературною формою виникнення відкладень, він стабільний при температурі нижче 42°C і метастабільний в області температур між 42°C і 98°C.

Таким чином, у водогрійних котлах і підігрівачах можуть відкладатися практично всі 3 форми сульфату кальцію (рис. 7).

Для карбонату кальцію основними є два типи кристалів – кальцит та арагоніт, при цьому наявність деяких іонів, присутніх в розчині в значній мірі впливає на швидкість кристалізації. Вона залежить від енергії гідратації та іонного радіусу. Катіони, що мають радіус менше, а енергію гідратації більше, ніж Ca²⁺ (крім Mn²⁺ і Cd²⁺) орієнтують виникнення кристалів арагоніту в осадах нормально кристалізуються у вигляді кальциту. Цей ефект не спостерігається при радіусі більшому, ніж радіус кальцію.

Таблиця 3. Механізм переходу від кальцита до арагоніту в залежності від іонного радіуса та енергії гідратації [5]

Катіони	Іонний радіус, А°	Енергія гідратації, ев	Перехід від кальцита до арагоніту під впливом іона
Mg ²⁺	0,78	21,2	присутній
Ni ²⁺	0,78	22,4	
Co ²⁺	0,82	22,6	
Fe ²⁺	0,83	21,7	
Zn ²⁺	0,83	22,9	
Cu ²⁺		22,3	
Mn ²⁺	0,91		відсутній
Cd ²⁺	1,03	20,1	
Ca ²⁺	1,06	17,7	
Sr ²⁺	1,27	16,6	
Pb ²⁺	1,32		
Ba ²⁺	1,43	15,0	

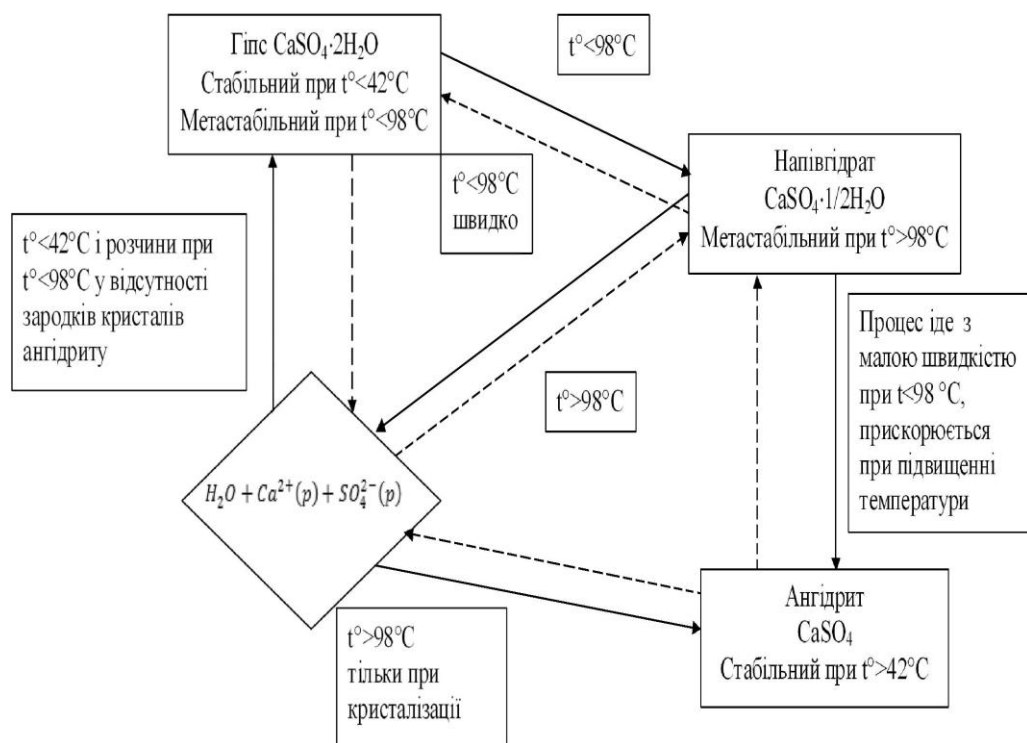


Рисунок 7. Области стабільних станів для 3-х форм сульфату кальцію

Окрім вказаних чинників інтенсивність накипоутворення залежить від температури теплопередаючої стінки і швидкості рідини. Остання визначає інтенсивність доставки накипоутворювачів до теплопередаючої поверхні. В результаті обробки експериментальних даних, отриманих у Всеросійському теплотехнічному інституті і Московському енергетичному інституті [3] складена математична модель процесу накипоутворення.

На рис. 8 показана залежність інтенсивності накипоутворення від швидкості потоку і

температури стінки.

Ця залежність виражається формулою:

$$j = \frac{5,55 \cdot 10^{-2} \cdot V}{V + 5,33} \cdot \exp(8,3 \cdot 10^{-2} \cdot t),$$

де V – швидкість потоку, м/с;

t – температура стінки, °С;

Коефіцієнт кореляції для 1 складає $R^2 = 0,998$, для 2 – $R^2 = 0,983$, для 3 – $R^2 = 0,994$.

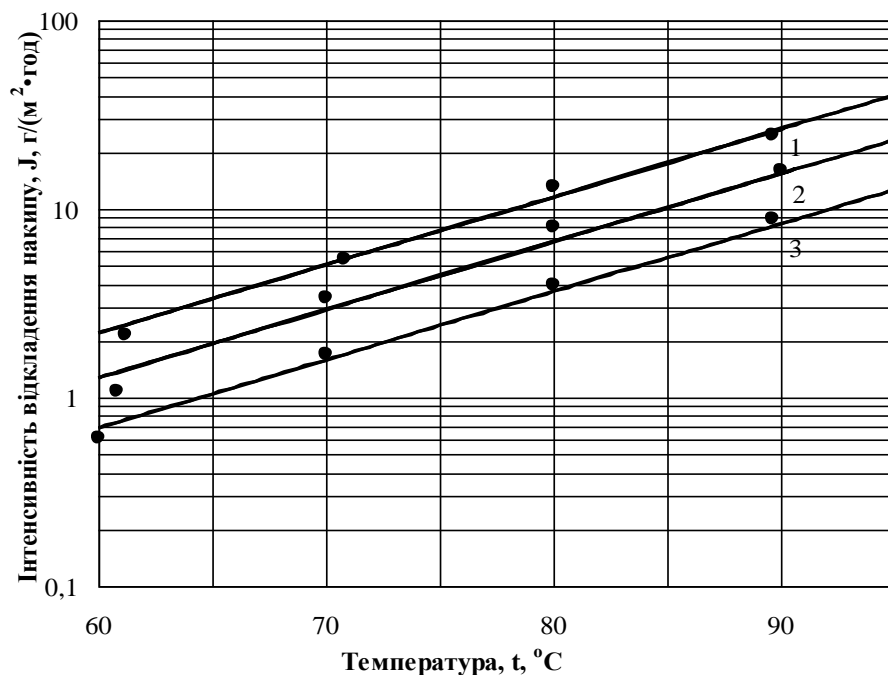


Рисунок 8. Залежність інтенсивності відкладення накипу від температури і швидкості потоку води (швидкості потоку: 1-2 м/с; 2-1 м/с; 3-0,5 м/с)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила технической эксплуатации тепловых электростанций и сетей. - Энергоиздат, 1989. – 288 с.
2. Высоцкий С.П., Бут Д.Н. Надежность работы систем теплофикации и технология обработки подпиточной воды. Сантехніка, опалення, кондиціонування (СОК): Щомісячний спеціалізований журнал. – К.: Медиа Технолоджи, 2007. – № 7.– С. 12-15
3. Ю.В. Балабан-Ирменин, А.В. Богловский, Л.Г. Васина, А.М. Рубанов. Закономерности накипеобразования в водогрейном оборудовании систем теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка. – 2004. – №3, С. 10-16
4. Высоцкий С.П., Поддубная Е.В. Использование слабокислотных катионитов в технологиях очистки воды // Химия и технология воды. – 2002. – Том 24. – №2, С. 167 – 174
5. Н. Rogues, A. Girou. Kinetics of the formation condition of carbonate tartars // Water Research, vol. 8. – P. 907-920

С.П. Высоцкий, А.В. Фаткулина

Накипеобразование в теплофикационных системах

Автомобильно-дорожный институт ДВНЗ ДонНТУ

Рассмотрены основные факторы, влияющие на интенсивность накипеобразования в теплофикационных системах. Карбонат кальция является основным накипеобразователем.

Отложения накипи существенно влияет на расход топлива.

образование накипи, индукционный период, расход топлива, карбонатный индекс

S. Vysotsky, A. Fatkulina

Scale formation in district heating systems

Main influenced on scale formation in district heating system are considered. Calcium carbonate creates main problem of scale formation. The scale formation influences significantly on fuel consumption.

scale formation, latent period, fuel consumption, carbonate index

Авторська справка

Висоцький Сергій Павлович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Екологія та безпека життєдіяльності" Автомобільно-дорожнього інституту ДВНЗ ДонНТУ.

Наукові інтереси: енергозбереження, системи очищення води, теплофікації, системи очищення газових викидів.

Energy efficiency, water treatment, district heating, waste gases purification.

Фаткуліна Ганна Василівна – старший викладач кафедри «Екологія та безпека життєдіяльності» Автомобільно-дорожнього інституту ДВНЗ ДонНТУ. Наукові інтереси: системи очищення води, мембранні технології, зворотній осмос.

1. Висоцький Сергій Павлович
2. 10 січня 1936 р.
3. Автомобільно-дорожній інститут ДВНЗ ДонНТУ, кафедра «Екологія та безпека життєдіяльності», буд. 51, вул. Кірова, 84646, м. Горлівка, Україна
4. буд. 29, кв. 39, пр. Перемоги, 84617, м. Горлівка, Україна
5. kafedraekologii@yandex.ru
6. 806242552406
7. Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Екологія та безпека життєдіяльності»
8. Професор, академік
9. Наукові інтереси: енергозбереження, системи очищення води, теплофікації, системи очищення газових викидів.

1. Фаткуліна Ганна Василівна
2. 21 серпня 1978 р.
3. Автомобільно-дорожній інститут ДВНЗ ДонНТУ, кафедра «Екологія та безпека життєдіяльності», буд. 51, вул. Кірова, 84646, м. Горлівка, Україна
4. буд. 1, кв. 1, вул. Пригородна, 84610, м. Горлівка, Україна,
5. kafedraekologii@yandex.ru
6. 806242552406
7. старший викладач кафедри «Екологія та безпека життєдіяльності»
8. інженер
9. Наукові інтереси: системи очищення води, мембранні технології, зворотній осмос.