

## ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ВОДИ НА ВИПАРОВУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПЛІВКИ ПОЛІДИМЕТИЛСИЛОКСАНУ

**В. Жук, к. т. н.**

*ORCID ID: 0000-0002-2275-0799*

*Національний університет «Львівська політехніка»*

**О. Гриців**

*ORCID ID: 0000-0003-4360-8772*

*ТзОВ «Асоціація інженерних підприємств», м. Львів*

**А. Регуш, к. т. н.**

*ORCID ID: 0000-0003-1427-4515*

*Львівський національний аграрний університет*

<https://doi.org/10.31734/architecture2020.21.056>

**Жук В., Гриців О., Регуш А. Зменшення втрат води на випаровування за допомогою плівки полідиметилсилоксану**

Підвищення середньорічної температури повітря – стійкий тренд останніх десятиліть як в Україні, так і у світі загалом. Глобальне потепління спричинює низку викликів і загроз у сфері гідротехнічного та водогосподарського будівництва, основним з яких є істотне порушення водного балансу територій та водних об'єктів за рахунок суттєвого зростання втрат води на випаровування. Упродовж останнього десятиліття тривають активний пошук, апробація та впровадження різних методів для зниження втрат води на випаровування, зокрема систем плаваючих, завислих чи модульних покриттів і накриттів, додавання у воду поліакриламідів чи спеціальних добавок, які утворюють на вільній поверхні води надтонкі плівки, спроможні ефективно збільшувати опір випаровуванню. Аналіз результатів попередніх досліджень вказує на перспективність застосування моноплівок зі спеціальних добавок для зменшення втрат води на випаровування з поверхні водойм різних розміру та призначення. Найдослідженішими на сьогодні добавками такого типу є жирні спирти: цетиловий спирт (гексадеканол), стеариловий спирт (октадеканол) та їхні суміші, які зменшують втрати води на випаровування в середньому на 20–30%, у деяких випадках – до 50–60 %. Останніми роками шукають нові, ефективні й дешевші добавки для зменшення випаровування; особливий інтерес у цьому напрямі становлять силіконові оливи – полімеризовані силоксани, кремнійорганічні рідини, які широко використовують у системах змащення, гідроприводах, у медицині й косметології, в харчовій промисловості та ін. У лабораторних квазістаціонарних умовах виконано серію дослідів із впливу на швидкість випаровування водопровідної води одного з перспективних видів спеціальних добавок – полідиметилсилоксану марки ПДМС-200. У результаті неперервного 33-добового експерименту отримано сумарне зменшення втрат води на випаровування в посудині з плівкою з ПДМС-200 товщиною 100 мкм на 50,5 % порівняно з аналогічною посудиною без добавок.

**Ключові слова:** випаровування води, моноплівка, силіконова олива, полідиметилсилоксан, швидкість випаровування.

**Zhuk V., Hrytsiv O., Rehush A. Retardation of water losses on evaporation by means of a layer of polydimethylsiloxane**

The increase in the average annual air temperature is a steady trend of recent decades both in Ukraine and in the world as a whole. Global warming causes a number of challenges and threats in the field of hydraulic and water engineering, the main of which is a significant violation of the water balance of territories and water bodies due to a significant increase in water losses due to evaporation. In recent decades, there has been an active search, testing and implementation of various methods to decrease water loss by evaporation, including systems of floating, suspended or modular coatings and coverings, adding polyacrylamide to water or special additives that form ultra-thin films on the free water surface, which are able to effectively increase the resistance to evaporation. Analysis of the results of previous studies indicates the prospects of using the monolayers of special additives to reduce water loss due to evaporation from the surface of reservoirs of different sizes and purposes. The most studied additives of this type today are fatty alcohols: cetyl alcohol (hexadecanol), stearyl alcohol (octadecanol) and their mixtures, which decrease water loss by evaporation by an average of 20–30%, in some cases – up to 50–60%. In recent years, there has been an active search for new, effective and cheaper additives to reduce evaporation; of particular interest in this direction are silicone oils – polymerized siloxanes, organosilicon fluids, which are widely used in lubrication systems, hydraulic drives, in medicine and cosmetology, in the food industry and others. In laboratory quasi-stationary conditions, a series of experiments on the effect on the evaporation rate of tap water of one of the promising types of special additives – polydimethylsiloxane PDMS-200 is fulfilled. As a result of a continuous 33-day experiment, a total reduction of evaporation water losses in a vessel with a 100 μm thickness film of PDMS-200 is obtained as 50.5% compared to a similar vessel without additives.

**Key words:** water evaporation, monolayer, silicone oil, polydimethylsiloxane, evaporation rate.

**Постановка проблеми.** Підвищення середньорічної температури повітря є стійким трендом останніх десятиліть як в Україні, так і у світі загалом. Дані українського Гідрометцентру свідчать, що за останні тридцять років середньорічна температура повітря загалом в Україні підвищилась на 1,2 °С. Встановлено, що швидкість зростання температури повітря за 1975–2019 рр. становить на території України від 0,61 до 0,82 °С / 10 років [1].

Глобальне потепління спричинює низку викликів і загроз у сфері гідротехнічного та водогосподарського будівництва, основним з яких є істотне порушення водного балансу територій та водних об'єктів за рахунок суттєвого зростання втрат води на випаровування.

Останні десятиліття тривають активний пошук, апробація та впровадження різних методів для зниження втрат води на випаровування, зокрема систем плаваючих, завислих чи модульних покриттів та накриттів, додавання у воду поліакриламідів чи спеціальних добавок, які утворюють на вільній поверхні води надтонкі плівки, що здатні ефективно збільшувати опір випаровуванню.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для зменшення випаровування з поверхні водних об'єктів усе частіше використовують моноплівки із спеціальних добавок, спроможних підвищувати опір випаровуванню. Такі добавки утворюють на поверхні води особливо тонку плівку товщиною від одного до кількох молекулярних шарів (моноплівку), здатну суттєво збільшувати опір випаровуванню води. Цей спосіб зменшення втрат води на випаровування протягом останніх десятиліть активно досліджують та впроваджують у найзасушливіших регіонах світу. Найдослідженішими на сьогодні добавками, які дають змогу зменшити втрати води на випаровування, є жирні спирти, зокрема цетиловий (гексадеканол,  $C_{16}H_{33}OH$ ), стеариловий (октадеканол,  $C_{18}H_{37}OH$ ) та їхні суміші, спроможні зменшити швидкість випаровування в середньому на 20–30%, у деяких випадках – навіть до 50–60 % [2–4].

Жирні спирти не мають запаху та кольору, не заважають проникненню світла у водойму і практично не впливають на вміст кисню у воді. Моноплівки також пригнічують процес утворення хвиль на воді, незначно підвищують температуру і сильно зменшують коефіцієнт поверхневого натягу водної поверхні.

Останніми роками триває активний пошук нових, ефективних і дешевших добавок для змен-

шення випаровування. При виборі речовини для створення моно плівок, окрім ефективності зниження втрат на випаровування, суттєве значення мають також економічні показники, безпечність для людей та водних організмів, спроможність ефективно пропускати сонячне випромінювання та кисень тощо. Особливий інтерес у цьому напрямі становлять силіконові оливи – полімеризовані силосани, кремнійорганічні рідини, які широко використовують у системах змащення, гідроприводах, у медицині та косметології, в харчовій промисловості та ін. [5].

**Постановка завдання.** Наше завдання – аналіз наявних результатів щодо зменшення втрат води на випаровування з вільної поверхні природних і штучних водойм за допомогою моноплівок спеціальних добавок, а також експериментальне дослідження у квазістатичних лабораторних умовах впливу на швидкість випаровування води добавки полідиметилсилоксану марки ПДМС-200.

**Виклад основного матеріалу.** Активне дослідження впливу особливо тонких плівок спеціальних добавок на швидкість випаровування води з вільної поверхні розпочалося у 1950-их роках. Ці дослідження виконували переважно у США та Австралії, для яких проблема втрат води на випаровування вже тоді була актуальною. У 1960 році відбувся спеціалізований Симпозіум Американського хімічного співтовариства, за підсумками якого видано збірку праць [2], із найважливішими на той час результатами щодо впливу моноплівок на випаровування води в натурних умовах.

Ефективність моноплівок виражають як відносне зниження швидкості випаровування порівняно з аналогічною вільною поверхнею води без плівки. Для натурального визначення швидкості випаровування з поверхні природних водойм використовують рівняння водного балансу:

$$Q_{in} + P = Q_{out} + S + E + \Delta H, \quad \text{мм / добу}, \quad (1)$$

де  $Q_{in}$ ,  $Q_{out}$  – швидкості припливу та відтоку води з водойми відповідно;  $P$  – кількість опадів;  $S$  – швидкість інфільтрації;  $E$  – швидкість випаровування;  $\Delta H$  – зміна рівня води (збільшення відповідає додатнім значенням).

Для підвищення точності визначення швидкості випаровування використовують спеціальні мірні ємності, які розміщують безпосередньо у водоймі. У такому разі припливом і відтоком води, а також інфільтрацією, можна знехтувати, а водний баланс набуває вигляду:

$$E = P - \Delta H. \quad (2)$$

Випаровування з мірної ємності  $E_{pan}$  зазвичай перевищує втрати на випаровування з поверхні водойми  $E_w$ :

$$E_w = E_{pan} K_{pan}, \quad (3)$$

де  $K_{pan}$  – коефіцієнт, що дорівнює співвідношенню швидкості випаровування з вільної поверхні у водоймі до швидкості випаровування з мірної ємності; наприклад, для ємності типу Колорадо  $K_{pan} = 0,78$  [3].

Більшість наявних на сьогодні результатів щодо впливу моноплівок на випаровування стосується використання жирних спиртів, найчастіше – двох їхніх різновидів: цетилового спирту або гексадеканола (хімічна формула  $C_{16}H_{33}OH$ ) та стеарилового спирту або октадеканола ( $C_{18}H_{37}OH$ ). Ефект добавок змінюється в досить широких межах: від 22 до 63% (табл. 1) і залежить як від виду добавки й товщини плівки, так і від способу формування плівки й від умов зовнішнього середовища (температура повітря і води, відносна вологість, інтенсивність сонячної радіації, швидкість вітру, наявність пилу та ін.).

Результати лабораторних досліджень впливу сумішей цетилового та стеарилового спиртів на швидкість випаровування проб води, відібраних із водосховищ Гуарапіранга та Біллінгс (Бразилія), наведені у праці [4]. Отримані результати вказують, що оптимальне масове співвідношення цих спиртів за ефектом зниження випаровування становить  $C_{16}:C_{18} = 1:9$ . Ефект від моноплівок значно більше залежить від об'єму мірних посудин та від умов зовнішнього середовища, ніж від складу природної води. Так, зменшення швидкості випаровування в чашках Петрі (з початковим об'ємом води 20 мл) становив для проб з водосховищ Гуарапіранга та Біллінгс відповідно 35,8 та 38,5 % (в іншому досліді для води з Біллінгс – навіть 57,0 %), тоді як для серії дослідів

у відносно більших мірних ємностях (2,0 дм<sup>3</sup>) – лише 15,2 та 19,2% відповідно.

Новий масштабний натурний експеримент із впливу на випаровування моноплівок гексадеканола тривалістю 20 тижнів, проведений у Туггурті (Алжир), показав досить високу ефективність чистого гексадеканола за особливо малих товщин плівок. У дві дослідні ємності типу Колорадо щодоби додавали відповідно по 0,09 мг та 0,15 мг гексадеканола, що відповідає поверхневій густині добавки 0,03 г/(м<sup>2</sup>×добу) та 0,05 г/(м<sup>2</sup>×добу). За питомої маси гексадеканола 812 кг/м<sup>3</sup> такі мікродози добавки відповідають середній добовій висоті шару моноплівок відповідно 37 нм та 62 нм. Середнє фактичне зменшення втрат води на випаровування при цьому становило відповідно 16 % та 22 %, що дає змогу виконувати в цьому діапазоні техніко-економічну оцінку використання добавок гексадеканола для зменшення випаровування для кліматичних умов Алжиру [3].

Важливий практичний недолік жирних спиртів як добавок для зменшення втрат на випаровування, – їхня відносно висока вартість. У світі продовжується активний пошук нових, ефективних і економічних добавок для зменшення випаровування. Останніми роками все частіше з'являється інформація про використання для таких цілей полідиметилсилоксанів [5].

**Результати експериментального дослідження.** Для верифікації ефективності плівок із силіконових олив у лабораторії кафедри «Гідротехніки та водної інженерії» Національного університету «Львівська політехніка» у квазістаціонарних умовах виконано серію дослідів із впливу на швидкість випаровування водопровідної води одного з перспективних видів спеціальних добавок – полідиметилсилоксану марки ПДМС-200.

Таблиця 1

**Ефективність зменшення втрат води на випаровування з водойм за допомогою моноплівок**

№	Водойма	Тип моноплівки	Середній ефект зменшення випаровування, %	Джерело
1	Озеро Сагуаро, Арізона, США	жирні спирти	23	[2]
2	Озеро в Найробі, Кенія	жирні спирти	60	[2]
3	Озеро Ігл-Пасс, Техас, США	жирні спирти	30–63	[2]
4	Туггурт, Алжир	гексадеканол	16–22	[3]
5	Водосховище Гуарапіранга, Бразилія	$C_{16}:C_{18}$ (1:9)	15,2–35,8	[4]
6	Водосховище Біллінгс, Бразилія	$C_{16}:C_{18}$ (1:9)	19,2–38,5 %	[4]

Середня розрахункова товщина плівки ПДМС-200 становила 100 мкм. Температура повітря за сухим термометром  $T_C$  змінювалася порівняно в незначних межах: 24,5–28,5 °С, температура за мокрим термометром  $T_M$ , – в діапазоні 20,6–24,7 °С, відносна вологість повітря  $\phi$  – у межах 57,0–81,9 %. Температура води  $T_B$  змінювалася від 22,6 °С до 25,5 °С. Досліди виконано паралельно у двох однакових ємностях: із шаром ПДМС-200 товщиною 100 мм на поверхні води та з чистою водою без добавок. Серію виконано у закритому приміщенні без прямого доступу сонячного світла, з мінімальною інтенсивністю ультрафіолетового випромінювання, для умов природної конвекції, без примусового руху повітря над дослідними посудинами.

Швидкість випаровування визначали об'ємним методом, вимірюючи щодоби залишкову масу посудин із рідиною за допомогою електронної ваги марки AXIS BDU-60 з допустимою похибкою вимірювань  $\pm 10$  г. Загальна тривалість неперервної серії становила 33 доби. Сумарна маса води, що випарувалася за цей час з посудини без

добавок, становила 3,002 кг, тоді як за наявності шару ПДМС-200 – лише 1,486 кг. Швидкість випаровування води без добавок змінювалася в окремі дні в межах від 0,64 мм/добу до 1,12 мм/добу за середнього значення за період досліджень 0,827 мм/добу. Для аналогічної посудини з водою, що містила на своїй поверхні шар полідиметилсилоксану ПДМС-200 товщиною 100 мкм, інтенсивність випаровування була значно нижчою: 0,32–0,64 мм/добу за середнього значення 0,405 мм/добу. Основні результати досліджень наведені в табл. 2.

Сумарний ефект добавок ПДМС-200 (інтегральну ефективність) визначали як відносне зменшення втрат води на випаровування за час від початку серії до контрольної дати:

$$E_C = \frac{\Delta M_{1C} - \Delta M_{2C}}{\Delta M_{1C}} \times 100\%, \quad (4)$$

де  $\Delta M_{1C}$ ,  $\Delta M_{2C}$  – сумарні втрати води на випаровування відповідно з посудини з чистою водою та з плівкою ПДМС-200 товщиною 100 мкм за перших  $t$  діб.

Таблиця 2

**Експериментальні результати впливу плівки полідиметилсилоксану ПДМС-200 товщиною 100 мкм на випаровування води**

№	Дата	$t$ , діб	$T_C$ , °С	$T_M$ , °С	$\phi$ , %	$T_B$ , °С	$\Delta M_{1C}$ , г	$\Delta M_{2C}$ , г	$E_C$ , %
1	30.07.2020	0	26,3	23,6	78,9	23,6	0	0	0
2	31.07.2020	1	25,2	21,8	73	23,2	87	62	28,7
3	01.08.2020	2	24,5	21,5	75,6	22,8	170	134	21,2
4	03.08.2020	4	26,2	23	75	22,8	336	261	22,3
5	04.08.2020	5	25,4	20,6	63	23	418	316	24,4
6	05.08.2020	6	25,5	22,7	77,7	23,6	498	366	26,5
7	06.08.2020	7	26,4	24,1	81,9	23,7	574	415	27,7
8	07.08.2020	8	26,2	22,8	73,7	23,9	646	455	29,6
9	08.08.2020	9	26,7	24	80,9	24,4	726	491	32,4
10	10.08.2020	11	28,5	24,3	69,5	25,3	888	570	35,8
11	11.08.2020	12	28,4	24,7	72,8	25,5	979	610	37,7
12	12.08.2020	13	27,8	24,3	73,9	25,1	1082	647	40,2
13	13.08.2020	14	27,8	23,7	63	24,7	1192	689	42,2
14	14.08.2020	15	27,7	21,7	57	24,5	1310	739	43,6
15	15.08.2020	16	27	22,8	68,7	24,3	1434	788	45,0
16	17.08.2020	18	26,4	23,1	74,5	24,2	1655	890	46,2
17	18.08.2020	19	26,4	23,1	74,5	24,2	1751	935	46,6
18	19.08.2020	20	26	22,5	72,8	24,1	1842	972	47,2
19	20.08.2020	21	25,7	22,8	77,3	23,8	1930	1010	47,7
20	21.08.2020	22	26,3	23,6	78,9	23,8	2006	1045	47,9
21	22.08.2020	23	26,7	23,5	77,1	24	2086	1081	48,2
22	26.08.2020	27	26,6	23,1	73,2	23,3	2435	1244	48,9
23	27.08.2020	28	26,6	21,8	64	23,4	2532	1290	49,1
24	29.08.2020	30	26,7	23,5	77,1	23,2	2724	1375	49,5
25	31.08.2020	32	27	23,1	70,6	23,9	2893	1445	50,1
26	01.09.2020	33	24,6	21,4	74,2	22,6	3002	1486	50,5

Сумарне зменшення втрат води на випаровування в посудині з плівкою з ПДМС-200 товщиною 100 мкм на 50,5 % порівняно з аналогічною ємністю без добавок (рис.), що відповідає найкращим відомим натурним результатам для моноплівок із жирних спиртів (табл. 1). Потрібно також зазначити, що у статичних лабораторних умовах плівка ПДМС-200 показала високу стійкість, ефективність добового зниження випаровування навіть дещо зростала в часі аж до завершення серії.

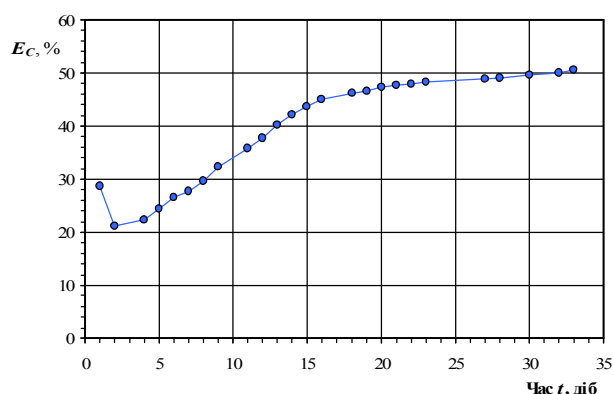


Рис. Інтегральна ефективність зниження випаровування води за використання плівки ПДМС-200 товщиною 100 мкм порівняно з посудиною без добавок

Товщина захисної плівки 100 мкм відповідає питомій витраті добавки 1 дм<sup>3</sup> на 10 м<sup>2</sup> водної поверхні, що за середньої роздрібною ціни ПДМС-200 близько 2,0 USD/дм<sup>3</sup> з економічного погляду дуже затратно. Залишається також відкритим питання щодо того, яка марка полідиметилсилоксану є найефективнішою з погляду зниження втрат води на випаровування. У майбутньому планується виконати аналогічні серії дослідів для захисних плівок різних марок ПДМС товщиною 1–10 мкм. Важливими чинниками, що можуть вплинути на ефективність захисних моноплівок з ПДМС, є також ультрафіолетове випромінювання та швидкість вітру, що також потрібно врахувати в наступних дослідженнях [5].

**Висновки.** Постійне зростання середньорічної температури повітря спричинює низку викликів і загроз у сфері гідротехнічного та водогосподарського будівництва, основним з яких є істотне порушення водного балансу територій та водних об'єктів за рахунок суттєвого зростання втрат води на випаровування. Огляд наявних результатів досліджень щодо зменшення втрат води на випаровування вказує на перспективність використання для цих цілей надтонких моноплівок зі спеціальних добавок.

У квазістаціонарних лабораторних умовах досліджено ефективність зниження швидкості випаровування водопровідної води за допомогою плівки з полідиметилсилоксану марки ПДМС-200. У результаті неперервного 33-добового експерименту отримано сумарне зменшення втрат води на випаровування у посудині з плівкою ПДМС-200 товщиною 100 мкм на 50,5 % порівняно з аналогічною посудиною з водою без добавок.

#### Бібліографічний список

1. Інформаційно-аналітична довідка про стан водних ресурсів держави та особливості сільськогосподарського виробництва в умовах змін клімату. URL: [http://naas.gov.ua/upload/iblock/78a/Інформаційна\\_дovidka\\_4.05.2020-конвертирован.pdf](http://naas.gov.ua/upload/iblock/78a/Інформаційна_дovidka_4.05.2020-конвертирован.pdf). (дата звернення 05.10.2019).
2. Retardation of Evaporation by Monolayers: Transport Processes. Ed. V.K. La Mer. Academic Press, New York, 1962. 277 pp.
3. Saggaï S., Bachi O.E.K. Evaporation reduction from water reservoirs in arid lands using monolayers. *Algerian experience. Water Resources*. 2018. Vol. 45, 2. P. 280–288.
4. Gugliotti M., Baptista M.S., Politi M.J. Reduction of evaporation of natural water samples by monomolecular films. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2005. Vol. 16, 6A. P. 1186–1190.
5. Жук В.М., Грищів О.Б., Регуш А.Я. Актуальність та шляхи зменшення втрат води на випаровування з поверхневих водних об'єктів в Україні. Ресурси природних вод Карпатського регіону. *Проблеми охорони та раціонального використання: матеріали Дев'ятнадцятої Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 8-9 жовтня 2019 р.): зб. наук. ст.* Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2019. С. 25–28.

Стаття надійшла 24.12.2019