

## ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ПРИРІСТ ХЛОРОФІЛСИНТЕЗУЮЧИХ МІКРОВОДОРОСТЕЙ

© Дячок В. В., Мандрик С. Т., Гуглич С. І., 2018

Досліджено вплив електромагнітного випромінювання на швидкість поглинання вуглекислого газу хлорофілсинтезуючими мікроводоростями. Отримано експериментальні залежності поглинання  $\text{CO}_2$  мікроводоростями залежно від впливу опромінення мікрохвильового електромагнітного (МЕМ) поля. Побудовано математичну модель приросту популяції мікроводоростей типу *Chlorella* залежно від часу та енергії опромінення МЕМ-полем. На основі математичної моделі та отриманих експериментальних результатів побудовано графік залежності поглинання  $\text{CO}_2$  мікроводоростями типу *Chlorella* за умови впливу МЕМ-опромінення. Встановлено оптимальне значення мікрохвильового електромагнітного випромінювання для проектування технологічних схем промислового очищення газових викидів від вуглекислого газу біологічним методом.

**Ключові слова:** фотосинтез, мікроводорості типу *Chlorella*, електромагнітне випромінювання, математична модель, кінетика.

V. V. Dyachok, S. T. Mandryk, S. I. Huhlych

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION ON THE INCREASE OF CHLOROPHYLL - PRODUCING MICROALGAE

© Dyachok V. V., Mandryk S. T., Huhlych S. I., 2018

The influence of electromagnetic radiation on the  $\text{CO}_2$  uptake rate by chlorophyll-producing microalgae was investigated. Experimental dependences of green gases absorption by microalgae in relation to endurance time were obtained. The mathematical model of growth of *Chlorella* type microalgae population depending on endurance time of electromagnetic radiation was developed. On the basis of the mathematical model solution and the experimental data obtained, a chart of the dependence of  $\text{CO}_2$  absorption by microalgae of the *Chlorella* type, provided that of electromagnetic radiation are present, was plotted. The calculated value of the endurance time of electromagnetic radiation for chlorophyll-producing microalgae growth was determined.

**Keywords:** Photosynthesis, electromagnetic radiation, *Chlorella*, chlorophyll synthesizing microalgae, biomass growth, mathematical model, kinetics.

**Постановка проблеми.** Ми живемо у вік надмірного електромагнітного випромінювання (ЕМВ). У природі джерелами електромагнітних полів є атмосферна електрика, космічне проміння, випромінювання Сонця. До антропогенних джерел належать: генератори, трансформатори, антени, мікрохвильові печі, мобільний зв'язок, холодильне обладнання, індукційні кухонні печі, монітори комп'ютерів тощо. Всі вони негативно впливають насамперед на організм людини.

Електромагнітне випромінювання – потужний фізичний подразник. Живі організми мають різну чутливість до природних та антропогенних (штучних) джерел електромагнітного випромінювання.

нювання: характер і вираженість біологічного ефекту залежать від параметрів електромагнітного випромінювання і рівня організації біосистеми. Міліметрові хвилі впливають переважно на рецепторний апарат, хвилі більшої довжини – на центральну нервову систему. Внаслідок дії електромагнітного випромінювання спостерігається розвиток катаракти, розлад психіки, підвищена втомленість і сонливість, поява слухових галюцинацій. Тривалий вплив випромінювання порушує функції серцево-судинної системи, погіршує обмін речовин, призводить до зміни складу крові, зниження біохімічної активності.

**Аналіз останніх публікацій.** Численними дослідженнями біологічних систем доведено, що організми – від одноклітинних до людини – є чутливими до постійного електромагнітного випромінювання. На сьогодні зібрано багато даних, які демонструють стимулюючу, інгібуючу або руйнівну дію даного випромінювання на мікробіологічні об'єкти. На думку багатьох науковців, біологічний вплив електромагнітного випромінювання зумовлений впливом на молекули води, розчинені в ній речовини та стан клітинних мембран. Властивість інгібувати або інактивувати розвиток мікроорганізмів мають усі відомі типи електромагнітного випромінювання. Встановлено мутагенний вплив електромагнітного випромінювання на одноланцюгові розриви дезокси-нуклеїнових кислот (ДНК), що призводить до збільшення хромосомних перетворень. В останніх наукових працях висвітлено пригнічення синтезу та репараційних процесів ДНК під впливом електромагнітних полів з частотою 50–100 Гц [1, 2].

Поряд із інгібувальною дією електромагнітного випромінювання, також є приклади стимулювання біологічних процесів життєдіяльності в системах. Електромагнітне випромінювання в заданому частотному діапазоні сприяє утворенню активних внутрішньоклітинних метаболітів. Також наведено дані щодо мікрохвильового електромагнітного випромінювання в діапазоні частот близько 900 МГц, які не підтверджують мутагенних ефектів на дріжджі *Saccharomyces cerevisiae*, а більш високочастотні поля в діапазоні 50–55 ГГц проявляють навіть стимулювальну дію [1]. Вплив електромагнітного випромінювання на багатоклітинні організми достатньо висвітлено у літературі [2], проте мало інформації щодо впливу його на одноклітинні організми, зокрема такі, як хлорофілсинтезуючої мікроводорості типу *Chlorella*.

У зв'язку з цим важливо дослідити вплив електромагнітного випромінювання на приріст хлорофілсинтезуючої мікроводорості типу *Chlorella*.

**Мета роботи** полягає у вивченні впливу електромагнітного випромінювання на швидкість поглинання  $\text{CO}_2$  хлорофілсинтезуючими мікроводоростями у водному середовищі.

**Теоретична частина.** Вважають, що за дії електромагнітного випромінювання в клітині відбуваються зміни, зокрема може змінюватися швидкість дифузії через мембрани, також можлива зміна орієнтації та конформації макромолекул, окрім того, можлива зміна стану електронної структури вільних радикалів, за їх наявності в структурній одиниці клітини. Очевидно, що механізми впливу електромагнітного випромінювання на клітини мікроводоросей зокрема мають неспецифічний характер та пов'язані зі зміною активності біологічної системи.

Спостерігаються два основні види впливу електромагнітного випромінювання на біологічні об'єкти: теплова дія; специфічна дія, яка пов'язана з поглинанням енергії молекулами білка, іонізація та поляризація молекул.

Вплив електромагнітного випромінювання на біологічні системи визначається кількістю енергії (Вт), яка поглинеться даною системою за час перебування її в цьому полі [3]:

$$W_{\text{погл.}} = \sigma \cdot S_{\text{ef}}, \quad (1)$$

де  $\sigma$  – густина потоку потужності випромінювання електромагнітної енергії, Вт/м<sup>2</sup>;  $S_{\text{ef}}$  – ефективна поглинальна поверхня, м<sup>2</sup>.

Унаслідок поглинання біологічною системою енергії випромінювання відбувається підвищення температури залежно від напруженості поля та часу перебування в ньому. Процес взаємодії

ЕМВ із живими організмами має послідовні етапи, зокрема: перший етап – це поглинання енергії електромагнітного випромінювання клітинами внаслідок розривання міжмолекулярних зв'язків та руйнування ДНК. На другому етапі відбувається перетворення енергії ЕМВ на хімічну, з утворенням іонів та вільних активних радикалів. Третій етап – це розвиток радіохімічних реакцій у живому організмі, який зазнав опромінення [3].

Вільні радикали – це сполуки з вільними електронами. Вільне місце в радикалах можуть зайняти електрони будь-якої речовини, найчастіше кисню. У цьому випадку кисень уже не зможе циркулювати в організмі й забезпечувати дихання. Вільні радикали володіють значною реакційною здатністю, тому руйнують клітини, стінки тканини. Отже, вільні радикали є вкрай шкідливими для будь-якого живого організму. Стимулятором їх утворення є ЕМВ.

Початковою ланкою в розвитку біохімічних перетворень під впливом ЕМВ є первинна інактивація (позбавлення активності) ферментів (основних каталізаторів та стимуляторів обміну речовин) вільними радикалами. У жирах під впливом радикалів відбуваються ланцюгові реакції окиснювання, що супроводжуються вивільненням вільних жирних кислот, які володіють токсичними властивостями. Дія ЕМВ призводить до розпаду молекул нуклеотидів, білків, які входять до складу ДНК, пригнічують синтез та активацію розпаду білків. Інакше кажучи, ЕМВ порушує обмін речовин – головний процес для підтримки життя в організмі. Порушення обміну речовин супроводжується вивільненням особливих речовин – гістаміну (сильного алергену), гемолізіну (руйнуючого кров'яні клітки), різних токсинів. Ці біохімічні порушення відбуваються усередині й поза клітинами й призводять до морфологічних змін, найрізноманітніших деформацій молекул, порушенням будови та зовнішнього вигляду клітин. Ступінь всіх порушень залежить від радіочутливості клітин: що вища радіочутливість, то більша кількість незворотніх процесів має місце в клітинах та в тканинах, з яких їх побудовано. Особливо чутливі до ЕМВ є тканини, в яких відбувається активний поділ клітин. На фоні електромагнітного впливу в живому організмі відбуваються зміни внутрішнього середовища клітин внаслідок накопичення вільних радикалів – токсинів. Накопичення токсинів призводить до подальшого руйнування клітин, відповідно, тканин та порушення гомеостазу живого організму. Накопичені зміни спричиняють порушення механізму адаптації живого організму до умов навколишнього середовища та не забезпечують стабільності внутрішнього середовища організму.

**Виклад основного матеріалу і обговорення результатів.** Для дослідження впливу електромагнітного випромінювання на мікроорганізми було обрано культуру зелених мікроводоростей типу *Chlorella* (рис. 1). Мікроскопічні хлорофілсинтезуючі мікроводорості типу *Chlorella* невибагливі до умов існування та здатні до інтенсивного розмноження, тому зустрічаються всюди: у прісних водоймах, морях та ґрунтах. Ці мікроводорості поглинають у десятки разів більше вуглекислого газу порівняно з наземними рослинами, тому є перспективним їх застосування в технологіях біологічного очищення газових викидів від парникових газів.



Рис. 1. Мікроводорості типу *Chlorella*

Експериментальні дослідження проводили у фотобіореакторах за певних значень мікрохвильового електромагнітного (МЕМ) випромінювання мікроводоростей. Окрім цього,

апаратурне оформлення досліджень забезпечувало достатню кількість поживного середовища у всьому об'ємі фотобіореактора для нормальної життєдіяльності мікроводоростей. Перемішування та освітлення за допомогою сонячної енергії сприяло інтенсифікації процесів поглинання парникових газів, що супроводжувалось зміною біомаси мікроводоростей. В основу процесів обміну клітини з середовищем та внутрішнього метаболізму покладено складний ряд організованих певним чином у просторі та часі біохімічних реакцій. У результаті цих перетворень змінюються концентрації клітин біомаси мікроводоростей та інші величини. Математичну модель, що описує залежність зміни концентрації клітин мікроводоростей типу *Chlorella* в середовищі культивування від часу  $N=N(dt)$ , наведено у роботі [4].

Відбирали біомасу мікроводоростей протягом восьми діб зі встановленим інтервалом часу. Визначали концентрацію біомаси водоростей фотоколориметричним методом. Для цього будували калібрувальну пряму методом вимірювання оптичної густини наперед відомих значень концентрації мікроводоростей у розчині (рис. 2). Згідно з отриманими даними будували калібрувальний графік.

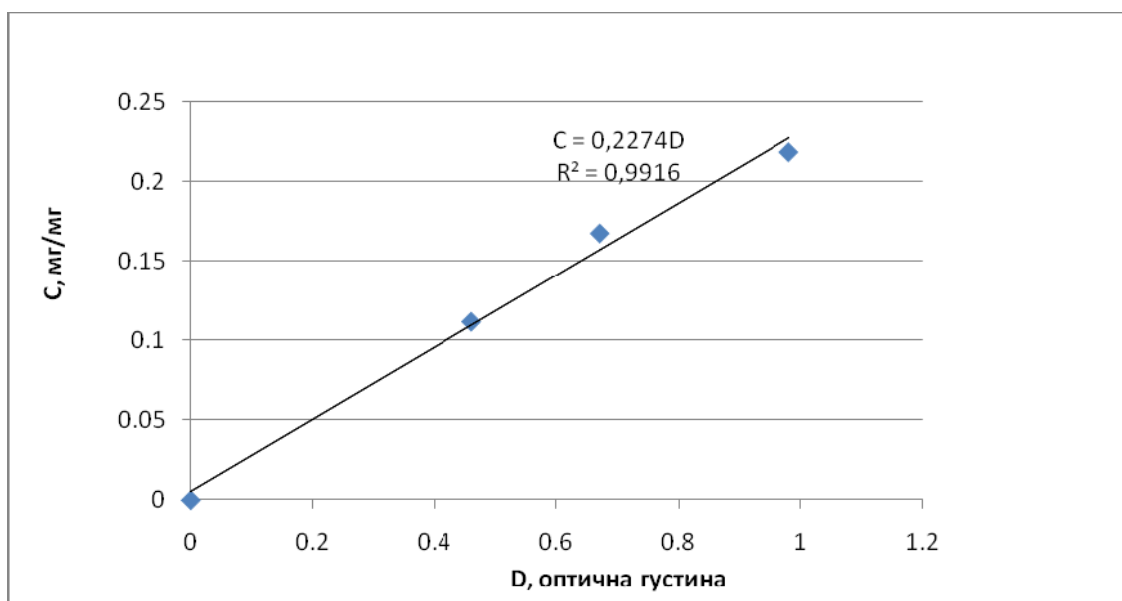


Рис. 2. Калібрувальна пряма визначення концентрації мікроводоростей у суспензії фотоколориметричним методом

Використовуючи побудований калібрувальний графік, визначали концентрацію колоній мікроводоростей у суспензії, оскільки отримана пряма описується рівнянням, тангенс кута нахилу якого становить  $k=0,2274$ ; а коефіцієнт детермінації  $R^2=0,9916$ .

На основі коефіцієнта  $k$ , отриманого за калібрувальним графіком (рис. 2) зміну оптичної густини приросту мікроводоростей *Chlorella* надалі переведено в концентрації  $C$  (мг/мл).

Згідно з експериментальними даними та розрахунковими величинами отримано графічні залежності зміни концентрації клітин мікроводоростей від часу за певних одноразових величин мікрохвильового електромагнітного (МЕМ) випромінювання в середовищі культивування (рис. 3).

Аналізуючи дані (рис. 3), слід зазначити, що зміна концентрації клітин мікроводоростей суттєво залежить від енергії МЕМ-випромінювання порівняно з контролем, який не зазнав впливу випромінювання. Спостерігається приріст мікроводоростей у середовищі культивування, яке добре перемішується та змінюється в часі залежно від енергії МЕМ випромінювання.

За незначних значень енергій МЕМ-випромінювання спостерігається незначний приріст клітин мікроводоростей – активація, але до певного значення. Як видно з рис. 3, у першому та другому фотобіореакторах спостерігається незначний ріст, який навіть на 5-й день є вищим ніж у контрольній пробі, проте з шостого дня спостерігається вирівнювання концентрацій із контролем.

Водночас зменшується концентрація клітин мікроводоростей порівняно з контролем у інших фотобіореакторах за значно більших значень енергії випромінювання МЕМ. Це засвідчує згубний вплив на клітини мікроводоростей, або відбувається інактивація.

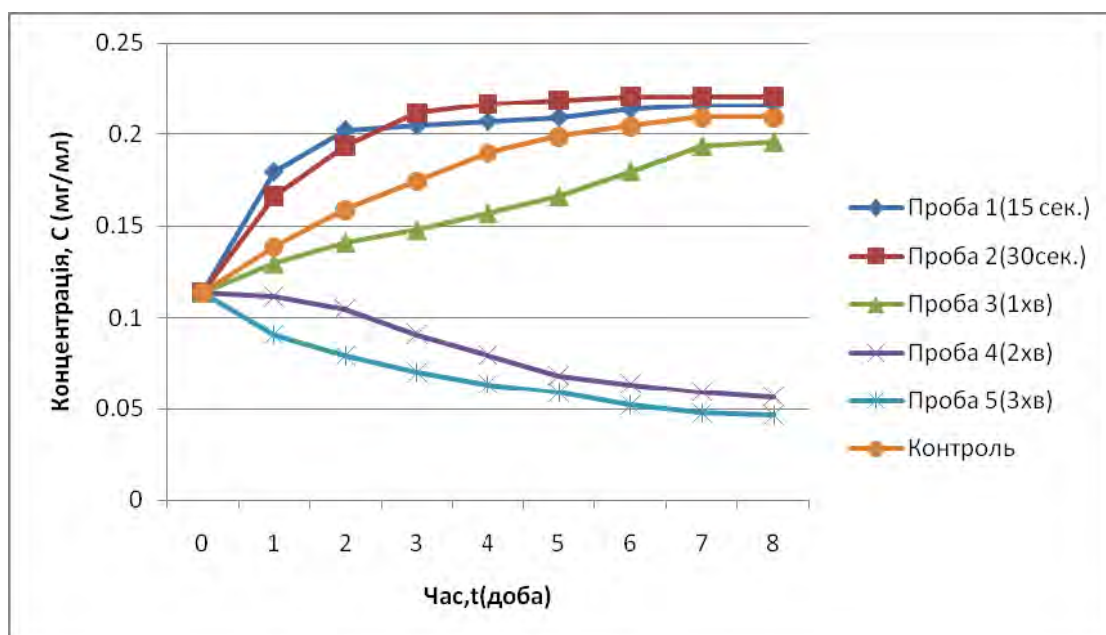


Рис. 3. Кінетика приросту мікроводоростей за певних величин МЕМ випромінювання

За однією з відомих теорій інактивації, МЕМ-випромінювання тільки за рахунок нагрівання інактивує мікроводорості. Зміни життєво важливих функцій мікроводоростей, зокрема процеси денатурації ферментів, білків, нуклеїнових кислот, пошкодження мембран та інше, відбуваються аналогічно, як за звичайного нагрівання.

Згідно з іншою теорією існують інші ефекти пригнічення росту мікроводоростей. Це зокрема такі: виникнення пор у мембрані за дії різниці електричних потенціалів на її поверхні; розрив клітинних мембран за дії цієї різниці потенціалів; руйнування клітин, яке відбувається внаслідок того, що деякі молекули всередині клітини, поглинаючи енергію мікрохвильового випромінювання, змінюються та руйнують внутрішні компоненти клітини мікроводоростей.

Єдиної думки про те, який з механізмів відбувається за МЕМ-випромінювання, сьогодні немає. Це пояснюється складністю порівняння звичайного та мікрохвильового нагрівання, оскільки умови нагрівання не однакові (мікрохвильове нагрівання відбувається швидше). Розподіл температур всередині суспензії мікроводоростей за різних шляхів нагрівання неодинаковий (за мікрохвильового нагрівання температура на поверхні суспензії менша, ніж у суспензії мікроводоростей, а за традиційного нагрівання – навпаки). За наявності МЕМ-випромінювання відбувається швидке нагрівання внаслідок різних електричних властивостей складових компонентів суспензії мікроводоростей.

За умов стаціонарного режиму МЕМ-випромінювання енергія, яка подається з магнетрону, повинна дорівнювати енергії, яка поглинається суспензією хлорофілсинтезуючих водоростей (іншими видами втрат знехтуємо). Тому енергію, яку поглинають мікроводорості, визначають за формулою:

$$W = p \times V = 2\pi\nu \times \epsilon_0 \times \epsilon'' \times E^2 \times V, \quad (2)$$

де  $V$  – об'єм досліджуваної суспензії в фотобіореакторі, а  $p$  – питома потужність випромінювання.

Якщо за постійних величин енергії ( $W = const$ ) та якісних параметрів суспензії хлорофілсинтезуючих водоростей ( $\epsilon'' = const$ ) зменшувати обсяг досліджуваного зразка  $V$ , то напруженість поля  $E$  зменшуватиметься обернено пропорційно квадратному кореню від обсягу.

Ця залежність дає змогу регулювати інтенсивність електричного поля за допомогою зміни обсягу досліджуваної суспензії мікрородоростей. Для цього в досліджуваній фотобіореактор встановлювали баласт (воду) із заданими параметрами. Тому з'являлася можливість регулювати інтенсивність поля в фотобіореакторі, змінюючи обсяг баласту.

Якщо обсяг, що піддавався нагріванню, достатньо малий, тоді інтенсивність поля перевищуватиме  $\varepsilon'' \times V$ . Тому масу вибираємо як контрольний параметр (легко виміряти та контролювати) для подальших досліджень.

Здатність суспензії чи розчину взаємодіяти з МЕМ-полем характеризується його комплексною діелектричною сталою

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'', \quad (3)$$

де  $\varepsilon'$  – діелектрична проникність, яка характеризує здатність досліджуваного продукту зберігати енергію МЕМ поля, а  $\varepsilon''$  – фактор втрат, який визначає здатність речовини поглинати енергію МЕМ-поля та перетворювати її на тепло.

Хоча діелектричні втрати та втрати провідності важко розділити, фактор втрат поділяється на дві складові:

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_{diel} + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}, \quad (4)$$

де  $\sigma$  – провідність досліджуваного зразка.

Для характеристики втрат замість  $\varepsilon''$  часто використовують інші параметри:

$\sigma_{екв} = \omega \times \varepsilon_0 \times \varepsilon''$  – еквівалентна провідність;

Діелектрична стала  $\varepsilon$  дозволяє визначити інші константи, які характеризують розподіл поля в просторі, зокрема  $\delta_p$  – глибина проникнення за потужністю;  $\delta$  – глибина проникнення за напруженістю та  $\lambda$  – довжина хвилі в досліджуваному зразку.

Для заданої частоти  $\nu = 2450$  МГц:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8}{245 \times 10^7} = 0,122 \text{ м} = 122 \text{ мм}. \quad (5)$$

Для більшості суспензій та розчинів біологічного середовища вода становить від 90 % до 95 % (навіть в молоці вода становить 90 %), тому для таких досліджуваних продуктів вплив кожного малого інгредієнта на комплексну діелектричну сталу  $\varepsilon$  не залежить від наявності чи відсутності інших малих інгредієнтів. Відповідно її можна записати у вигляді:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \sum_k \varepsilon_k, \quad (6)$$

де  $\varepsilon_0$  – комплексна константа для основного інгредієнта, а  $\varepsilon_k$  – поправки, які вносяться малими інгредієнтами.

Оскільки концентрації малих інгредієнтів  $c_k$  малі, то залежність поправок  $\varepsilon_k$  від концентрації  $c_k$  можна вважати лінійною, оскільки за значень  $c_k = 0$  поправка  $\varepsilon_k$  теж повинна відповідати значенню “нуль”, що підтверджується експериментальними даними (рис. 2).

Отже, теплота, яка виділяється в діелектрику, що знаходиться в мікрохвильовому електромагнітному полі, залежить від його комплексної діелектричної проникності  $\varepsilon$  за формулою (3) та знаючи питому теплову потужність (потужність, що виділяється в одиниці об'єму) за формулою (2):

$$p = 2\pi\nu \times \varepsilon_0 \times \varepsilon'' \times E^2, \quad (7)$$

звідки

$$E = \varepsilon' \times E_0, \quad (8)$$

де  $E_0$  – напруженість поля у вакуумі. За цими формули обчислюють просторово однорідний необмежений діелектрик.

У нашому випадку діелектрик є двофазною системою. Одну з фаз назвемо середовищем, а величини, які належать до неї, позначимо індексом 2, а іншу – включеннями, і відповідні величини

позначимо індексом 1. Поле поблизу включень та в середині самого включення спотворюється, тобто не визначається за формулою (8). Припускаємо, що концентрація включень настільки мала, що спотворення магнітного поля, спричинені окремими включеннями, не накладаються одне на одне, та відповідно напруженість електромагнітного поля в середовищі подалі від включень  $E_2$  визначається за формулою (8). У цьому випадку напруженість МЕМ-поля всередині включень визначаємо за формулою:

$$E_1 = \gamma \times E_2, \quad (9)$$

$\Gamma$  – коефіцієнт, котрий залежить від форми включень. Зокрема для включень сферичної форми згідно з [5] становить:

$$\gamma = \frac{3\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2 + 2\varepsilon'_1}. \quad (10)$$

Отримані результати вимірювань комплексної діелектричної проникності показали, що для деяких мікроорганізмів, які розглядаються як включення, середовище культивування  $\varepsilon''_1 > \varepsilon''_2$ . Звідси випливає, що питома потужність, яка виділяється в мікроорганізмі, більша, ніж та, що виділяється в середовищі, тому мікроорганізми нагріваються більше, ніж середовище культивування. В цьому й полягає явище вибіркового нагрівання в МЕМ-полі хлорофілсинтезуючих мікроводоростей.

Ці теоретичні припущення та розрахунки підтверджуються експериментальними даними зміни концентрації мікроводоростей залежно від енергії мікрохвильового випромінювання порівняно з контролем (рис. 4). Як видно з рисунка, за отримання енергії випромінювання понад 3 кДж спостерігається зменшення концентрації мікроводоростей у фотобіореакторі.

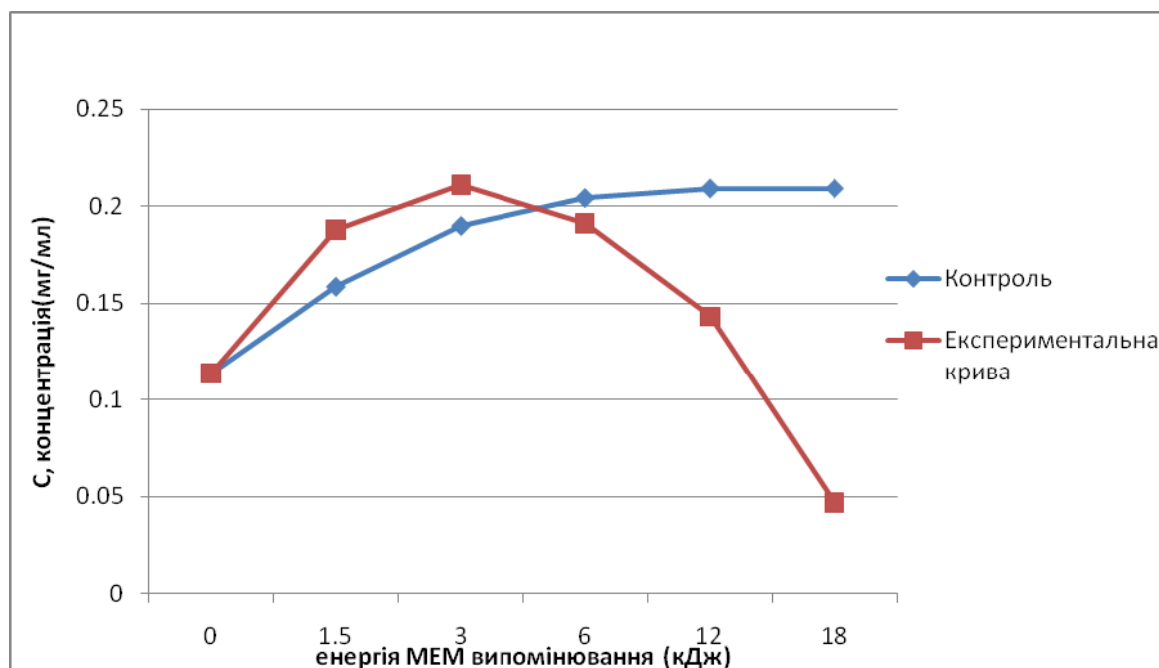


Рис. 4. Зміна концентрації мікроводоростей під впливом МЕМ-випромінювання

Якщо говорити не про летальність, а про зміни в мікроводоростях за дії МЕМ-випромінювання, то багато авторів повідомляють, що такі зміни за дії малопотужного випромінювання не призводять до суттєвої зміни температури мікроводоростей [5–6]. Процес може залежати від параметрів МЕМ-випромінювання: потужності, часу експозиції, неперервне воно чи імпульсне, механізм інактивації також може залежати і від виду мікроводоростей. Тобто, слід акцентувати увагу про згубний вплив МЕМ-випромінювання на живі організми, зокрема мікроводорості та застосовувати його у процесах очищення газових викидів від парникових газів, зокрема вуглекислого.

**Висновок.** Наведено результати експериментальних досліджень приросту біомаси хлорофілсинтезуючих мікроводоростей залежно від енергії мікрохвильового електромагнітного випромінювання. Встановлено згубний вплив МЕМ-випромінювання енергією понад 3 кДж на приріст мікроводоростей типу *Chlorella*, а відтак на поглинання вуглекислого газу.

1. Голдовская Л. Ф. *Химия окружающей среды: учебник для вузов по специальности “Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов”*. – 3-е изд. – М.: Мир, 2008. – 295 с. 2. Золотарьова О. К., Шнюкова Є. І., Сиваш О. О., Михайленко Н. Ф. *Перспективи використання мікроводоростей у біотехнології / під ред. О. К. Золотарьової*. – К.: Альтерпрес, 2008. – 234 с. 3. Клап Я. А., Яремкевич О. С., Червецова В. Г., Заярнюк Н. Л., Новіков В. П., *Дослідження впливу електромагнітних, постійних магнітних та акустичних полів на мікроорганізми // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Хімія, технологія речовин та їх застосування”*. – 2016. 4. Дячок В. В., Гуглич С. І., Левко О. Б. *Вивчення впливу температури на кінетику поглинання вуглекислого газу мікроводоростями // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Хімія, технологія речовин та їх застосування”*. – 2015. – № 812. – С. 365–372. 5. Бурдо О. Г., Рыбина О. Б. *Процессы инактивации микроорганизмов в микроволновом поле*. – Одеса: 2010. – 1981 с. 6. Dyachok V., Huhlych S., Yatchyshyn Y., Zaporochets Y., Katysheva V. *About the problem of biological processes complicated by mass transfer // Chemistry & Chemical Technology*. – 2017. – Т. 11, No. 1. – С. 111–116.