

УДК 579.[222].[4:3]:243]:546.[4:562]

О. М. Василів, С. О. Гнатуш, О. І. Білий, В. Б. Гетьман

Львівський національний університет ім. Івана Франка

ВПЛИВ СОЛЕЙ ФЕРУМУ ТА МАНГАНУ НА РІСТ І СВІТЛОРОЗСІЮВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ БАКТЕРІЙ *DESULFUROMONAS ACETOXIDANS*

Desulfuromonas acetoxidans – грамнегативні строго анаеробні сульфурредуквальні еубактерії. Досліджено вплив різних концентрацій ферум (III) хлорид гексагідрату, ферум (II) сульфату та манган (II) хлорид тетрагідрату на ріст і світлорозсіювальні властивості сірководнювальних бактерій *D. acetoxidans*. Встановлено кореляцію між нагромадженням біомаси та змінами світлорозсіювальних параметрів клітин досліджуваних бактерій за впливу згаданих солей. Максимум кривої розподілу клітин становив 0,49 мкм за впливу всіх досліджуваних концентрацій ферум (II) сульфату, ферум (III) хлорид гексагідрату та манган (II) хлорид тетрагідрату. Найвищий відносний вміст клітин максимального розміру (0,49 мкм) та найбільшу біомасу спостерігали за впливу 2,5 мМ $FeCl_3 \times 6H_2O$ та 0,5 мМ $MnCl_2 \times 4H_2O$. Найбільшу біомасу *D. acetoxidans* зафіксовано при внесенні до середовища 2,5 мМ $FeSO_4$, а найбільший відносний вміст клітин максимального розміру – при 0,5–1,5 мМ $FeSO_4$.

О. М. Василів, С. А. Гнатуш, А. І. Білий, В. Б. Гетьман

Львівський національний університет ім. Івана Франка

ВЛИЯНИЕ СОЛЕЙ ФЕРРУМА И МАРГАНЦА НА РОСТ И СВЕТОРАССЕЙВАЮЩИЕ СВОЙСТВА БАКТЕРИЙ *DESULFUROMONAS ACETOXIDANS*

Desulfuromonas acetoxidans – грамнегативные строго анаэробные серовосстанавливающие эубактерии. Исследовано влияние разных концентраций феррум гексагидрата хлорида железа (III), сульфата железа (II) и тетрагидрата хлорида марганца (II) на рост и светорассеивающие свойства бактерий *D. acetoxidans*. Установлена корреляция между накоплением биомассы и изменением светорассеивающих параметров клеток исследуемых бактерий под влиянием перечисленных солей. Максимум кривых распределения клеток составил 0,49 мкм для всех концентраций сульфата железа (II), гексагидрата хлорида железа (III) и тетрагидрата хлорида марганца (II). Самое высокое относительное содержание клеток максимального размера (0,49 мкм) и самое большое значение биомассы наблюдали под влиянием 2,5 мМ $FeCl_3 \times 6H_2O$ и 0,5 мМ $MnCl_2 \times 4H_2O$. Самая большая биомасса *D. acetoxidans* обнаружена при внесении в среду 2,5 мМ $FeSO_4$, а самое большое относительное содержание клеток максимального размера – при 0,5–1,5 мМ $FeSO_4$.

О. М. Vasylyv, S. O. Hnatush, O. I. Bilyy, V. B. Getman

Ivan Franko Lviv National University

INFLUENCE OF FERROUS AND MANGANESE SALTS ON GROWTH AND LIGHT SCATTERING PROPERTIES OF *DESULFUROMONAS ACETOXIDANS* BACTERIA

Desulfuromonas acetoxidans are obligatory anaerobic gram-negative sulfurreducing eubacteria. The influence of different concentrations of iron (III) chloride hexahydrate, iron (II) sulfate and manganese (II) chloride hexahydrate on *D. acetoxidans* growth and light scattering properties has been investigated. The correlation between biomass accumulation and changes of the cells' light scattering properties has been ascertained under the influence of the 3d transition metal salts. The maximum of cell distribution curve equaled 0.49 μm under the influence of all investigated concentrations of iron (III) chloride hexahydrate, iron (II) sulfate and manganese (II) chloride hexahydrate. The highest relative content of cells with maximal size (0.49 μm) and the largest biomass were observed under the influence of 2.5 mM $\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$ and 0.5 mM $\text{MnCl}_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$. Under the influence of FeSO_4 the highest *D. acetoxidans* biomass was obtained with addition of 2.5 mM metal salt in the growth medium. The highest relative cell content with maximal size was observed under the influence of 0.5–1.5 mM FeSO_4 .

Вступ

Desulfuromonas acetoxidans – безбарвні сіркобактерії, що населяють збагачені сполуками сульфуру водні середовища. Це грамнегативні строгі анаероби, здатні утворювати гідроген сульфід [11]. Сірковідновлювальні бактерії суттєво впливають на біогеохімію осадових середовищ, оскільки вони беруть участь у відновному осадженні металів. Іони металів – ксенобіотики, тобто чужорідні для біосфери сполуки. На відміну від органічних сполук, які розкладаються до кінцевих продуктів (вуглекислого газу, води, метану тощо), сполуки важких металів не здатні розщеплюватися до простих речовин.

Проблема дослідження взаємодії сірковідновлювальних бактерій із металами актуальна, оскільки використання цих мікроорганізмів, резистентних до високих концентрацій токсичних металів у навколишньому середовищі, дасть змогу нейтралізувати токсичність кінцевого продукту дисиміляційного відновлення сірки – гідроген сульфід – та іонів металів унаслідок їх часткового зв'язування з утворенням нерозчинних осадів.

Світлорозсіювальні властивості бактерій визначаються такими фізичними параметрами клітин як показник заломлення, форма та розміри [3]. Світлорозсіювання клітинами мікронних розмірів базується на явищі дифракції та має значення лише за наявності прямого кута між падаючим і відбитим променями. Інтенсивність розсіювання світла за даних умов визначається об'ємом клітин, а також залежить від певних фізичних чинників, зокрема особливостей поверхні клітини. Складові клітин (нуклеїнова кислота, цитоплазма, мембрани тощо) мають різні показники заломлення. Показники заломлення бактеріальних клітин, отримані Б. А. Фіхман [4], свідчать, що абсолютного значення показника заломлення для бактерій певного виду не існує, оскільки спостерігається варіювання значень у межах популяції. Показник заломлення бактеріальної клітини визначається біохімічним складом цитоплазми, який змінюється в широких межах, і залежить від осмолярності навколишнього середовища.

Інший важливий параметр для оцінки світлорозсіювальних властивостей суспензій бактеріальних клітин – їх розмірний розподіл. Визначення розподілу оптичними методами, за літературними даними, можливе в рамках теорії Релея [15], теорії розсіювання Мі [10] і теорії Релея – Ганса [7; 8]. Спорідненість показників заломлення цитоплазми бактеріальних клітин і навколишнього середовища, яка відповідає критерію застосування теорії Релея – Ганса, дає підстави стверджувати, що дана модель прийнятна для опису процесів розсіювання світла мікробіологічними об'єктами. Інформацію про розміри досліджуваних часток у рамках даних теоретичних моделей можна отримати методом так званого статичного розсіювання світла. При даному підході про розмір частки судять за амплітудою інтенсивності імпульсу розсіяного світла, що реєструється фотоспектричною системою [12]. Точну інформацію про розміри досліджуваних часток у рамках даних теорій можна отримати лише з кутових залежностей діаграм розсіювання світла. У випадку мікробіологічних об'єктів, коли

показник заломлення клітин мікроорганізмів n незначно відрізняється від показника заломлення води n_0 (середовища, в якому розміщені досліджувані мікроорганізми), відношення інтенсивностей розсіяного світла до падаючого світла I_θ змінюється на декілька порядків.

D. acetoxidans здатні одержувати енергію за анаеробних умов при окисненні ацетату до діоксиду карбону в циклі трикарбонових кислот шляхом взаємодії процесів окиснення ацетату, відновлення сірки та деяких металів, зокрема Fe^{3+} і Mn^{2+} [16]. Ферум (III) і манган (IV) також здатні неензиматично окиснювати сульфід, утворюючи молекулярну сірку. Тому за наявності S^0 та Fe^{3+} чи Mn^{2+} в анаеробних осадах сульфід, який дифундує із зони відновлення сульфату, зв'язується з *Fe* чи *Mn*, у результаті чого відбувається його детоксикація [6]. Проблема захисту навколишнього середовища від антропогенного забруднення металами, зокрема, надмірними концентраціями солей *Fe* та *Mn*, надзвичайно актуальна. Один з основних напрямів її розв'язання – застосування біотехнологій, що ґрунтуються на ефективних біологічних механізмах детоксикації небезпечних речовин мікроорганізмами.

Властивість бактерій *D. acetoxidans* використовувати S^0 , *Fe* (III) і *Mn* (IV) як акцептори електронів при окисненні органічного вуглецю забезпечує їх особливу адаптацію до змін довкілля. Клітини цих бактерій розглядають як високоефективний матеріал мікробно-анодних паливних елементів [9; 13].

Дослідження процесів використання бактерій для утворення електричного струму відображає ефективний метод біоутворення енергії, оскільки бактерії здатні до самовідтворення, у результаті чого окиснення органічної речовини є самопідтримувальним. Теоретично, будь-яка біоперетворювана органічна речовина може використовуватись як матеріал для мікробно-анодних паливних елементів, включаючи леткі кислоти, вуглеводи, білки, спирти й навіть відносно стійкі матеріали, такі як целюлоза. Встановлено, що чиста культура сірковідновлювальних бактерій *D. acetoxidans* утворює електричний струм потужністю 14 мВт/м² у двокамерних повітряних катодах мікробно-анодних паливних елементів [9].

Використання Microbial Fuel Cell технологій як високоефективних і самовідтворювальних моделей для очищення стічних вод, що містять енергію у формі біоперетворюваної органічної речовини, надзвичайно перспективне, оскільки на сьогодні витрачається велика кількість енергії для її видалення, замість пошуку можливостей отримання енергії з наявних органічних сполук. Проте у стічних водах є ксенобіотики у високих концентраціях, зокрема іони металів, що значно пригнічують виживання бактерій, здатних до їх окиснення.

Мета нашої роботи – оцінити вплив концентрації ферум (III) хлорид гексагідрату, ферум (II) сульфату і манган (II) хлорид тетрагідрату на ріст і світлорозсіювальні властивості сірковідновлювальних бактерій *Desulfuromonas acetoxidans*, використовуючи новий метод отримання інформації про світлорозсіювальні параметри клітин на основі їх розмірного розподілу та відносного вмісту.

Матеріал і методи досліджень

Культуру *D. acetoxidans* вирощували протягом 10 діб за анаеробних умов за +30 °С у модифікованому середовищі Постгейта С [5] за додаткового внесення $FeCl_3 \times 6H_2O$, $FeSO_4$ та $MnCl_2 \times 4H_2O$ у концентрації 0,5–2,5 мМ. У контрольному варіанті солей металів додатково не вносили. Біомасу визначали за мутністю розведної суспензії клітин шляхом фотометрування на фотоспектроколориметрі КФК-3 ($\lambda = 395$ нм, оптичний шлях – 3 мм). Біомасу (г/л) розраховували за формулою:

$$C = \frac{E_{395} \cdot n}{K},$$

де E_{395} – скетинція при 395 нм, n – фактор розведення (разів), $K = 0,65 \pm 0,15$ – коефіцієнт перерахунку для *D. acetoxidans*, отриманий ваговим методом (для фотоспектроколориметра КФК-3).

Для розчинення осадів сульфідів металів (утворених у результаті взаємодії досліджуваних солей металів із кінцевим продуктом дисиміляційної сульфурредукції, що здійснюється *D. acetoxidans*), які зумовлювали похибку вимірювання внаслідок підвищення мутності досліджуваних проб, безпосередньо перед вимірюванням до бактеріальної суспензії вносили 40 % розчин лимонної кислоти у перерахунку на концентрацію утворених сульфідів металів.

Для визначення розмірного розподілу часток [1; 2] запропоновано метод, що базується на реєстрації змін інтенсивності розсіяного ними світла, шляхом статистичного набору змін амплітуди та тривалості імпульсів для часток заданого розміру, побудові на основі одержаних даних вимірювання кореляційної функції, що виражає статистичні характеристики інтенсивності розсіювання світла, і одержання розподілу часток за розмірами, шляхом розв'язання інтегрального рівняння Фредгольма першого роду:

$$F(U, t) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K(U, t, r) n(r) d(r), \quad (1)$$

де r_{\min} і r_{\max} – нижня та верхня межі діапазону розмірів часток, що реєструються, $n(r)$ – функція розподілу часток за розмірами, $K(U, t, r)$ – функція розподілу нормованих значень амплітуд і тривалості реєстрованих імпульсів розсіяного світла калібрувальних часток – результат попереднього зондування потоку рідини монохроматичним когерентним світлом полімерних латексів заданого розміру, і відомим показником заломлення.

Бактерії *D. acetoxidans* культивували у рідкому середовищі та визначали часову залежність зміни кількості клітин і фонових часток у культуральному середовищі. У вибраному інтервалі розмірів визначали кількість клітин бактерій, їх відносний вміст шляхом розрахунку відношення кількості клітин у певному розмірному діапазоні до їх загальної концентрації. На основі отриманих даних будували залежності змін кількості клітин і їх відносного вмісту у вибраному інтервалі розмірів від часу культивування.

При дослідженні впливу $FeSO_4$, $FeCl_3 \times 6H_2O$ та $MnCl_2 \times 4H_2O$ на світлорозсіювальні параметри клітин *D. acetoxidans* із використанням описаного методу бактерії вирощували у пробірках об'ємом 20 мл у модифікованому середовищі Постгейта С за +28 °С та анаеробних умов. У культуральне середовище вносили солі досліджуваних металів у концентраціях 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 мМ. На середині експоненціальної фази росту (третья доба культивування) відбирали 1 мл суспензії бактерій, розводили у 100 разів і проводили вимірювання за допомогою пристрою ПРМ-6М, розробленого на кафедрі фізичної та біомедичної електроніки факультету електроніки ЛНУ ім. Івана Франка.

Статистичне опрацювання даних здійснювали за такими параметрами: знаходили основні статистичні показники за безпосередніми даними (середнє арифметичне – M ; стандартна похибка середнього арифметичного – m). Для оцінки достовірності різниці між статистичними характеристиками двох альтернативних сукупностей даних обчислювали коефіцієнт Стюдента. Достовірною вважалася різниця при показнику достовірності $p > 0,95$. Статистичне опрацювання результатів проводили, використовуючи програму Origin.

Вплив солей Fe та Mn на ріст *D. acetoxidans*

Досліджено кінетику росту сірководновловальних бактерій *D. acetoxidans* за впливу різних концентрацій $MnCl_2 \times 4H_2O$, $FeSO_4$ та $FeCl_3 \times 6H_2O$. При дослідженні впливу $MnCl_2 \times 4H_2O$ на ріст бактерій *D. acetoxidans* найбільшу біомасу спостерігали за концентрації 0,5 мМ солі металу в середовищі (рис. 1а). За впливу максимальної досліджуваної концентрації $MnCl_2 \times 4H_2O$ (2,5 мМ) біомаса бактерій зменшується на 2–8 % порівняно з контролем протягом усього часу вирощування.

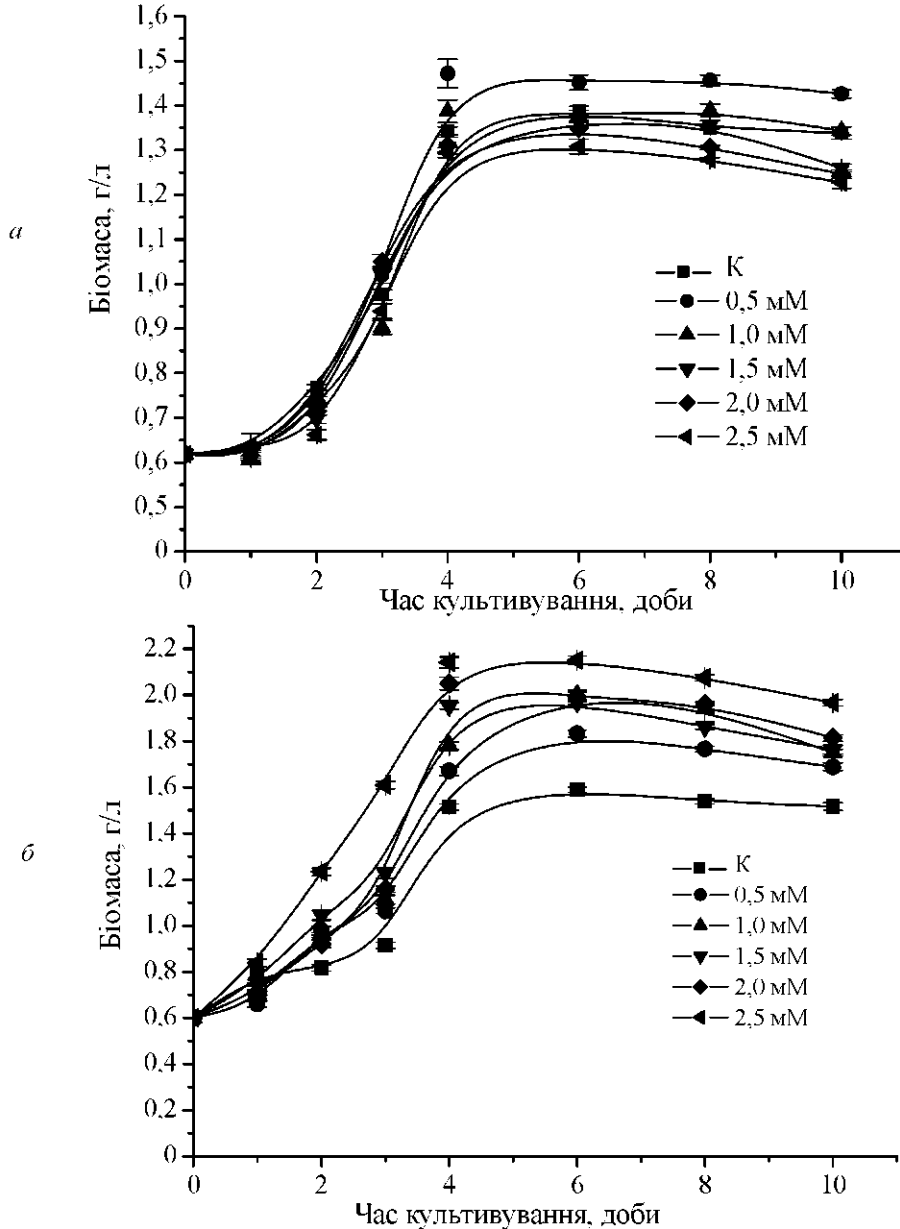


Рис. 1. Ріст бактерій *D. acetoxidans* за впливу різних концентрацій $MnCl_2 \times 4H_2O$ (а) та $FeSO_4$ (б)

При дослідженні впливу різних концентрацій $FeSO_4$ на нагромадження біомаси *D. acetoxidans* встановлено, що зі збільшенням вмісту солі в середовищі біомаса зрос-

тає. Найвищу біомасу бактерій зафіксовано за максимальної досліджуваної концентрації $FeSO_4$ – 2,5 мМ (рис. 1б). За цих умов біомаса бактерій збільшилась на 41 % порівняно з контролем на четверту добу культивування. За впливу 0,5 мМ $FeSO_4$ біомаса бактерій зростає на 16 % порівняно з контролем при збільшенні часу культивування з третьою по восьму добу, а за внесення 2,5 мМ $FeSO_4$ – на 76 і 80 % відповідно. Очевидно, $FeSO_4$ сприяє росту сірководновлювальних бактерій *D. acetoxidans*, оскільки $Fe(II)$ входить до складу багатьох ферментів сірко- та сульфатвідновлювальних бактерій, зокрема таких, як супероксиддисмутаза (один із ключових ферментів антиоксидантного захисту), гідрогенази (забезпечують продукування водню). Як бачимо з результатів дослідження, іони $Fe(II)$ необхідні для росту сірководновлювальних бактерій, що пояснює його підсилення зі зростанням концентрації $FeSO_4$ у середовищі.

За впливу $FeCl_3 \times 6H_2O$ на ріст сірководновлювальних бактерій найвищу біомасу зафіксовано на четверту добу росту за максимальної досліджуваної концентрації солі металу (2,5 мМ), проте її значення було нижчим на 25 % порівняно зі впливом $FeSO_4$. Збільшення концентрації $FeCl_3 \times 6H_2O$ у середовищі з 1,0 до 2,5 мМ зумовило зростання на 2–21 % біомаси бактерій на третю добу культивування порівняно з контролем (рис. 2).

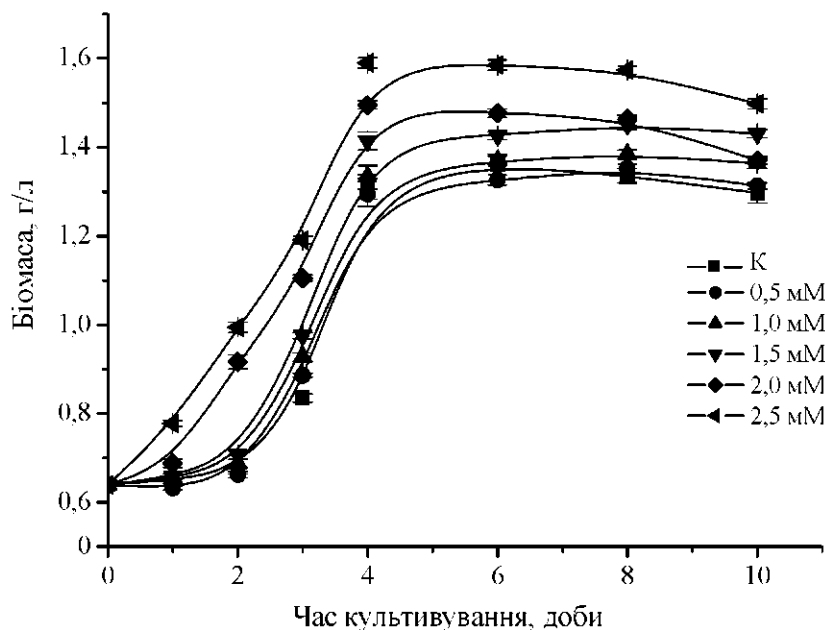


Рис. 2. Ріст бактерій *D. acetoxidans* за впливу різних концентрацій $FeCl_3 \times 6H_2O$

Отримані результати, ймовірно, можна пояснити тим, що у процесі Fe^{3+} -редукції, притаманній сірководновлювальним бактеріям *D. acetoxidans*, лише за достатньої концентрації іонів Fe^{3+} у середовищі даний процес відбувається зі стабільною швидкістю та інтенсивністю, у результаті чого спостерігали посилення росту досліджуваних бактерій. За низької концентрації металу в середовищі, очевидно, даний процес відбувається з меншою інтенсивністю і, відповідно, біомаса нижча.

Вплив $MnCl_2 \times 4H_2O$, $FeSO_4$ та $FeCl_3 \times 6H_2O$ на світлорозсіювальні властивості сірководновлювальних бактерій *D. acetoxidans*

Оскільки нагромадження біомаси бактерій характеризується або зростанням кількості клітин, або збільшенням їх розмірів, дослідження світлорозсіювальних властиво-

стей клітин *D. acetoxidans* (розмірного розподілу та їх відносного вмісту в певному розмірному діапазоні) допоможе зробити багатофакторний аналіз ростової здатності за певних умов культивування.

Досліджено взаємозв'язок між впливом $MnCl_2 \times 4H_2O$, $FeSO_4$ та $FeCl_3 \times 6H_2O$ на нагромадження біомаси та світлорозсіювальними властивостями клітин *D. acetoxidans*. Результати вимірювання розмірного розподілу та відносного вмісту клітин бактерій *D. acetoxidans* у вибраному діапазоні розмірів на третій день культивування за впливу $MnCl_2 \times 4H_2O$ наведені на рисунку 3а.

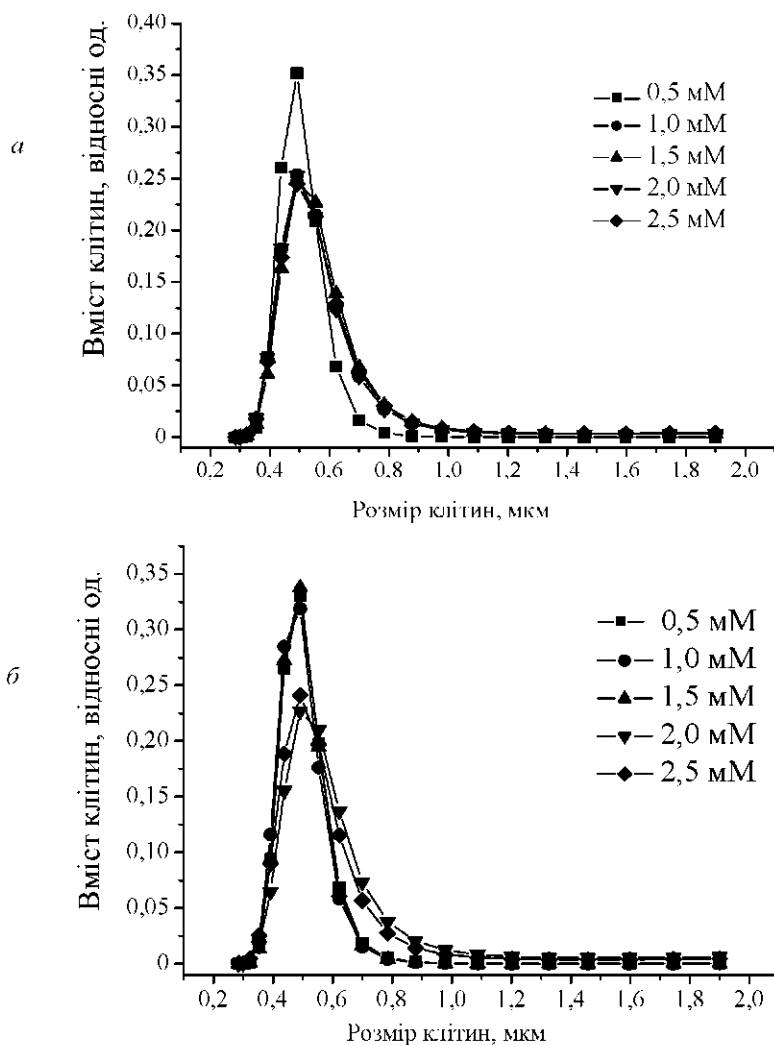


Рис. 3. Залежності розмірного розподілу клітин бактерій *D. acetoxidans* за впливу різних концентрацій $MnCl_2 \times 4H_2O$ (а) та $FeSO_4$ (б)

Розмірний розподіл – у межах 0,3–1,9 мкм, а його максимум становить 0,49 мкм за впливу всіх досліджуваних концентрацій $MnCl_2 \times 4H_2O$. В усіх досліджуваних контрольних зразках, які не містили солей металів, максимальний розмір клітин також становив 0,49 мкм, а відносний уміст змінювався від 0,18 до 0,26 відносних одиниць. Найвищий відносний вміст клітин із максимальним розміром спостерігали за впливу мінімальної досліджуваної концентрації $MnCl_2 \times 4H_2O$ (0,5 мМ). Зростання концентрації

солі Mn у ростовому середовищі до 2,5 мМ зумовлювало зменшення відносного вмісту клітин на 39 % порівняно з концентрацією 0,5 мМ $MnCl_2 \times 4H_2O$ та на 8 % порівняно з контролем.

За впливу $FeSO_4$ бактерій *D. acetoxidans* максимум кривої розмірного розподілу становив 0,49 мкм на третій день культивування. (рис. 3б). Найбільше значення відносного вмісту клітин максимального розміру зафіксоване за впливу мінімальних досліджуваних концентрацій $FeSO_4$ (0,5 та 1,0 мМ). Зростання концентрації солі в ростовому середовищі до 2,5 мМ спричиняло зменшення відносного вмісту клітин максимального розміру (0,49 мкм) на 37 % порівняно з концентрацією 0,5 мМ $FeSO_4$, а також підвищення на 26 % порівняно з контролем.

Гістограма розмірного розподілу клітин досліджуваних бактерій і їх відносного вмісту у вибраному діапазоні розмірів на третю добу культивування (на експоненціальній фазі росту) за впливу $FeCl_3 \times 6H_2O$ наведена на рисунку 4. Максимум розмірного розподілу клітин становив 0,49 мкм за впливу всіх досліджуваних концентрацій солі. Підвищення концентрації $FeCl_3 \times 6H_2O$ у середовищі з 0,5 до 2,5 мМ зумовлювало зростання відносного вмісту клітин максимального розміру [14].

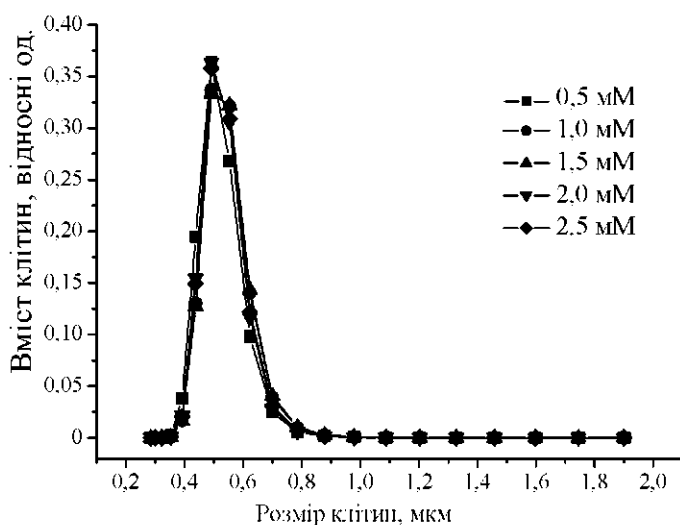


Рис. 4. Залежності розмірного розподілу клітин бактерій *D. acetoxidans* за впливу різних концентрацій $FeCl_3 \times 6H_2O$

Висновки

Установлено часткову кореляцію між нагромадженням біомаси та змінами світлорозсіювальних параметрів клітин бактерій *D. acetoxidans* за впливу $FeCl_3 \times 6H_2O$, $FeSO_4$ та $MnCl_2 \times 4H_2O$. Максимум кривої розподілу клітин становив 0,49 мкм за впливу всіх досліджуваних концентрацій ферум (II) сульфату, ферум (III) хлорид гексагідрату та манган (II) хлорид тетрагідрату. Найвищий відносний вміст клітин максимального розміру та найбільше значення біомаси спостерігали за впливу 2,5 мМ $FeCl_3 \times 6H_2O$ та 0,5 мМ $MnCl_2 \times 4H_2O$. За впливу $FeSO_4$ найвищу біомасу зафіксовано при максимальній досліджуваній концентрації солі металу (2,5 мМ), а найбільший відносний вміст клітин максимального розміру – за впливу мінімальних досліджуваних концентрацій $FeSO_4$ (0,5–1,5 мМ).

Бібліографічні посилання

1. Білий О. І. Метод визначення розподілу мікрочастинок за розмірами в дисперсних середовищах / О. І. Білий, В. Б. Гетьман, Я. М. Матвійчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. – № 2. – С. 23–26.
2. Білий О. І. Новий оптичний метод контролю вмісту бактерій у рідинних розчинах / О. І. Білий, В. Б. Гетьман, І. Я. Коцюмбас, М. С. Рожко // Біофізичний вісник. – 2001. – Вип. 1 (8) – С. 121–126.
3. Сидько Ф. Я. Поляризаційні характеристики взвесь біологічних частиц / Ф. Я. Сидько, В. Н. Лопатин, Л. Е. Парамонов. – Новосибирск : Наука, 1990. – 120 с.
4. Фихман Б. А. Микробиологіческая рефрактометрия. – М. : Медицина, 1967. – 280 с.
5. Biebl H. Growth of sulfate-reducing bacteria with sulfur as electron acceptor / H. Biebl, N. Pfennig // Arch. Microbiol. – 1977. – Vol. 112. – P. 115–117.
6. Eric E. Dissimilatory Fe(III)-reduction by the marine microorganism *Desulfuromonas acetoxidans* / E. Eric, R. Derck // Applied and Environmental Microbiology. – 1993. – Vol. 59, N 3. – P. 734–742.
7. Katz A. Bacteria size determination by elastic light scattering / A. Katz, A. Alimova, M. Xu et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2003. – Vol. 9, N 2. – P. 277–287.
8. Koch L. Theory of the angular dependence of light scattered by bacteria and similar-sized biological objects // J. Theor. Biol. – 1968. – Vol. 18, N 1. – P. 133–156.
9. Logan B. E. Microbial Fuel Cells. – Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2008. – 213 p.
10. Murray J. Application of Mie theory and cubic splines to the representation of light scattering patterns from bacteria in the logarithmic growth phase / J. Murray, D. Hukins, P. Evans // Phys. Med. Biol. – 1979. – Vol. 24, N 2. – P. 408–415.
11. Pfennig N. *Desulfuromonas acetoxidans* gen. nov. and sp. nov., a new anaerobic, sulfur-reducing, acetate-oxidizing bacterium / N. Pfennig, H. Biebl // Arch. Microbiol. – 1976. – Vol. 110. – P. 3–12.
12. Schärtl W. Light Scattering from Polymer Solutions and Nanoparticle Dispersions. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2007. – 191 p.
13. The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: Powering a meteorological buoy / L. M. Tender, A. S. Gray, E. G. Groveman et al. // J. Power Sources. – 2008. – Vol. 179, N 3. – P. 571–575.
14. The influence of $3d^3$ type transition metals on light scattering properties of sulfur cycle bacteria *Desulfuromonas acetoxidans* / O. I. Bilyy, O. M. Vasylyv, S. O. Hnatysh et al. // Proc. SPIE 8087. 808725–1–6 (2011).
15. Yguerabide J. Light-scattering submicroscopic particles as highly fluorescent analogs and their use as tracer labels in clinical and biological applications / J. Yguerabide, E. Yguerabide // Analytical Biochemistry. – 1998. – Vol. 262, N 2. – P. 137–156.
16. Electricity generation from acetate and glucose by sedimentary bacterium attached to electrode in microbial-anode fuel cells / E. Zhang, W. Xu, G. Diao, C. Shuang // J. Power Sources. – 2006. – Vol. 161. – P. 820–825.

Надійшла до редакції 01.07.2011