

УДК 759.873.088.5:661.185

ROLE OF THE SURFACTANTS SYNTHESIZED UNDER DIFFERENT CULTIVATION CONDITIONS OF *ACINETOBACTER CALCOACETICUS* IMV B-7241, *RHODOCOCCUS ERYTHROPOLIS* IMV AC-5017 AND *NOCARDIA VACCINII* IMV B-7405 IN OIL POLLUTION DESTRUCTION

T. Pirog, S. Antonuk, L. Nikitiuk
National University of Food Technologies

Key words:

Acinetobacter calcoaceticus IMV B-7241
Rhodococcus erythropolis IMV Ac-5017
Nocardia vaccinii IMV B-7405
Surfactants
Traditional substrates and industrial waste
Oil destruction

Article history:

Received 06.05.2017
Received in revised form 02.06.2017
Accepted 19.06.2017

Corresponding author:

T. Pirog
E-mail:
npnuht@ukr.net

ABSTRACT

The article investigates the influence of surfactants, synthesized under cultivation of *Acinetobacter calcoaceticus* IMV B-7241, *Rhodococcus erythropolis* IMV Ac-5017 and *Nocardia vaccinii* IMV B-7405 on traditional substrates and industrial waste, on the decomposition of oil in water (2.6—6 g/l) and soil (20 g/kg) as well as in the presence of heavy toxic metals (0.01—0.5 mM Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+}). It was found that the highest degree of oil destruction (up to 95%) was observed when using cultural liquid after cultivation of studied strains on hexadecane and liquid paraffins. The introduction of Cu^{2+} (0.1—0.5 mM) in the exponential phase of IMB B-7241 and IMB Ac-5017 strains growth on non-hydrocarbon substrates (ethanol, waste oil) was accompanied by the formation of surfactants in the presence of which degree of decomposition of complex with heavy metals oil pollutions increased by 8—15% compared to using preparations synthesized in medium without copper cations. Intensification of oil destruction in the presence of such surfactants can be explained by activating influence of Cu^{2+} on the activity of alkane hydroxylases (the first enzyme of n-alkanes catabolism in producers), and as a consequence, by the preliminary adaptation of cells to petroleum hydrocarbons assimilation.

DOI: 10.24263/2225-2924-2017-23-4-6

РОЛЬ ПОВЕРХНЕВО АКТИВНИХ РЕЧОВИН, СИНТЕЗОВАНИХ У РІЗНИХ УМОВАХ КУЛЬТИВУВАННЯ *ACINETOBACTER CALCOACETICUS* IMB B-7241, *RHODOCOCCUS ERYTHROPOLIS* IMB AC-5017 І *NOCARDIA VACCINII* IMB B-7405 У ДЕСТРУКЦІЇ НАФТОВИХ ЗАБРУДНЕНЬ

Т.П. Пирог, С.Б. Антонюк, Л.В. Никитюк
Національний університет харчових технологій

У статті досліджено вплив поверхнево-активних речовин (ПАР), синтезованих за умов росту *Acinetobacter calcoaceticus* IMB B-7241, *Rhodococcus*

erythropolis IMB Ac-5017 і *Nocardia vaccinii* IMB B-7405 на традиційних субстратах і промислових відходах, на розкладання нафти у воді (2,6–6 г/л) та ґрунті (20 г/кг), у тому числі й за наявності важких токсичних металів (0,01–0,5 мМ Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+}). Встановлено, що найвищий ступінь деструкції нафтових забруднень (до 95 %) спостерігався за наявності культуральної рідини після вирощування досліджуваних штабів на гексадекані та рідких парафінах. Внесення Cu^{2+} (0,1–0,5 мМ) в експоненційній фазі росту штабів IMB B-7241 і IMB Ac-5017 на неуглеводневих субстратах (етанол, відпрацьована олія) супроводжувалося утворенням ПАР, після обробки якими забруднених нафтою та важкими металами води і ґрунту ступінь розкладання нафти підвищувався на 8–15% порівняно з використанням препаратів ПАР, синтезованих у середовищі без катіонів міді. Інтенсифікація деструкції нафти за наявності таких ПАР може бути зумовлена активуючим впливом Cu^{2+} на активність алкангідроксилази (перший фермент катаболізму *n*-алканів у штабів-продуцентів) і, як наслідок, попередньою адаптацією клітин до споживання вуглеводнів нафти.

Ключові слова: *Acinetobacter calcoaceticus* IMB B-7241, *Rhodococcus erythropolis* IMB Ac-5017, *Nocardia vaccinii* IMB B-7405, поверхнево-активні речовини, традиційні субстрати і промислові відходи, деструкція нафти.

Постановка проблеми. Поверхнево-активні речовини (ПАР) широко використовуються у різних галузях промисловості, у зв'язку з чим попит на синтетичні ПАР постійно зростає. Разом з тим темпи розвитку біотехнології на сучасному етапі та підвищення уваги до збереження довкілля зумовили великий інтерес дослідників до мікробних ПАР як альтернативи хімічним аналогам. Завдяки екологічній безпечності, здатності емульгувати гідрофобні сполуки та підвищувати ефективність розкладання ксенобіотиків мікробні ПАР є перспективними для застосування у природоохоронних технологіях [1–4].

У попередніх дослідженнях [1; 5; 6] нами було показано, що поверхнево-активні речовини, синтезовані *Acinetobacter calcoaceticus* IMB B-7241, *Rhodococcus erythropolis* IMB Ac-5017 і *Nocardia vaccinii* IMB B-7405 на традиційних субстратах, інтенсифікують процеси розкладання нафти у воді та ґрунті, у тому числі й за наявності важких металів. Встановлено, що одним із механізмів інтенсифікації розкладання нафти є активація природної (автохтонної) нафтоокиснювальної мікробіоти під впливом мікробних ПАР.

Пізніше [7] було показано, що біологічні властивості ПАР (антимікробна й антиадгезивна активність, здатність руйнувати біоплівки) залежать від умов культивування *A. calcoaceticus* IMB B-7241, *R. erythropolis* IMB Ac-5017 і *N. vaccinii* IMB B-7405. Такі дані засвідчили необхідність проведення подальших досліджень з впливу умов культивування на властивості мікробних ПАР з метою одержання цільового продукту зі стабільними заданими властивостями залежно від галузі потенційного практичного застосування.

Мета статті: дослідити вплив поверхнево-активних речовин *A. calcoaceticus* IMB B-7241, *R. erythropolis* IMB Ac-5017 і *N. vaccinii* IMB B-7405, синтезованих у різних умовах культивування, на розкладання нафтових забруднень у воді та ґрунті.

Матеріали і методи. *R. erythropolis* IMB Ac-5017 вирощували у рідкому середовищі (г/л): NaNO_3 — 1,3, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,1, NaCl — 1,0, Na_2HPO_4 — 0,6, KH_2PO_4 — 0,14, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,001, pH 6,8—7,0. Як субстрат використовували етанол, гексадекан і відпрацьовану (пересмажену) соняшникову олію у концентрації 2% (об'ємна частка).

Для культивування *A. calcoaceticus* IMB B-7241 використовували середовище такого складу (г/л): $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ — 0,35, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,1, NaCl — 1,0, Na_2HPO_4 — 0,6, KH_2PO_4 — 0,14, pH 6,8—7,0. У середовище додатково вносили дріжджовий автолізат — 0,5 (об'ємна частка) і розчин мікроелементів — 0,1 (об'ємна частка). Джерело вуглецю — гексадекан, рідкі парафіни, етанол, рафінована і відпрацьована соняшникова олія в концентрації 2 (об'ємна частка).

Штам *N. vaccinii* IMB B-7405 вирощували у середовищі, що містило (г/л): NaNO_3 — 0,5, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,1, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — 0,1, KH_2PO_4 — 0,1, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,001, дріжджовий автолізат — 0,5 % (об'ємна частка). Джерело вуглецю та енергії — очищений гліцерин, технічний гліцерин (відходи виробництва біодизелю), рафінована і відпрацьована соняшникова олія в концентрації 2 (об'ємна частка).

У деяких варіантах в експоненційній фазі росту штамів *A. calcoaceticus* IMB B-7241 і *R. erythropolis* IMB Ac-5017 у середовище вносили Cu^{2+} (0,1—0,5 мМ) у вигляді 1М розчину $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Як інокулят використовували культури в експоненційній фазі росту, вирощені на відповідних рідких середовищах, що містили 0,5—1% (об'ємна частка) субстрату. Кількість посівного матеріалу (10^4 — 10^5 кл/мл) становила 5—10% від об'єму поживного середовища. Культивування бактерій здійснювали в колбах об'ємом 750 мл з 100 мл середовища на качалці (320 об./хв) при 28—30 °C упродовж 120 год.

Як препарати поверхнево-активних речовин використовували постферментаційну культуральну рідину.

Моделювання забрудненого нафтою і катіонами металів ґрунту. У пластикову емність вносили 1 кг ґрунту, 25 мл нафти, препарати ПАР (100 мл), 0,01% діамонійфосфат як джерело біогенних елементів і перемішували. При комплексному забрудненні нафтою і катіонами металів у ґрунт вносили (окремо і в комбінаціях) 0,01—0,5 мМ Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} у вигляді 1М розчинів солей $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ і $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COOH})_4$ відповідно. Зразки кожні три дні примішували для покращення аерації та зволожували стерильною водою. Тривалість експерименту 20 діб.

Моделювання забруднених нафтою і металами водою. У пластикову емність вносили 2 л бюветної води, на поверхню якої наносили 6—15 мл нафти, після чого додавали препарати ПАР у концентрації 5% (об'ємна частка), а також 0,01—0,5 Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} окремо і в різних комбінаціях. Як джерело біогенних елементів використовували діамонійфосфат (0,01%). Тривалість експерименту 17—30 діб.

Визначення вмісту нафти. Кількість нафти визначали ваговим методом. Для цього здійснювали трикратну екстракцію нафти гексаном (співвідношення

1:1). Органічний екстракт упарювали до постійної маси на роторному випарнику IP-1M2 (Росія) при температурі 55 °С і абсолютному тиску 0,4 атм.

Всі досліди проводили в трьох повторностях, кількість паралельних визначень в експериментах становило від 3 до 5. Статистичну обробку експериментальних даних проводили за методикою, описаною раніше у [5; 6]. Відмінності середніх показників вважали достовірними при рівні значущості $p < 0,05$.

Результати і обговорення. Літературні дані [1; 4] свідчать, що найефективніше видалення вуглеводнів досягається за використання мікроорганізмів, здатних асимілювати нафту з одночасним синтезом ПАР. У зв'язку з цим як основні препарати для нафтоочищення використовували культуральну рідину, що містить як клітини нафтоокиснювальних бактерій, так і утворені ними ПАР.

У табл. 1 наведено дані про вплив ПАР, синтезованих *A. calcoaceticus* ІМВ В-7241, *R. erythropolis* ІМВ Ас-5017 і *N. vaccinii* ІМВ В-7405 у середовищі з різними джерелами вуглецевого живлення, на розкладання нафти у воді. Експерименти показали, що незалежно від природи використовуваного субстрату і концентрації нафти у воді (3,0 і 6,0 г/л) ступінь її деструкції за наявності культуральної рідини усіх штамів був достатньо високим (70—98%). Проте найвищий ступінь розкладання нафти (92—95%) спостерігався у разі обробки забрудненої води культуральною рідиною після вирощування штамів на рідких парафінах і гексадекані. Очевидно, що під час культивування на цих субстратах відбувається попередня адаптація клітин до споживання вуглеводнів.

Таблиця 1. Деструкція нафти у воді за наявності культуральної рідини після вирощування *R. erythropolis* ІМВ Ас-5017, *A. calcoaceticus* ІМВ В-7241 і *N. vaccinii* ІМВ В-7405 на різних вуглецевих субстратах

Штам-продуцент ПАР	Джерело вуглецю у середовищі культивування	Деструкція (%) нафти за початкової концентрації (г/л)	
		3,0	6,0
<i>R. erythropolis</i> ІМВ Ас-5017	Етанол	83	73
	Гексадекан	95	92
	Відпрацьована олія	72	70
<i>A. calcoaceticus</i> ІМВ В-7241	Етанол	82	80
	Гексадекан	94	92
	Рідкі парафіни	93	92
	Відпрацьована олія	79	77
	Рафінована олія	88	80
	Нерафінована олія	70	71
<i>N. vaccinii</i> ІМВ В-7405	Очищений гліцерин	84	82
	Технічний гліцерин	90	80
	Рафінована олія	72	70
	Відпрацьована олія	79	70

Примітки. Експозиція — 25 діб. Табл. 1—5: під час визначення ступеня деструкції нафти похибка не перевищувала 5%.

У попередніх дослідженнях [8] встановлено, що додавання Cu^{2+} (0,01—0,5 мМ) в експоненційній фазі росту штамів ІМВ В-7241, ІМВ Ас-5017 і ІМВ В-7405 на гідрофобних (гексадекан, рідкі парафіни, соняшникова олія) і гідрофільних (етанол, гліцерин) субстратах супроводжувалося підвищенням умовної концентрації ПАР на 25—140% порівняно з показниками на середовищі без катіонів міді. Максимальна інтенсифікація синтезу ПАР спостерігалася у разі внесення Cu^{2+} в середовище з вуглеводнями, а підвищення синтезу ПАР за наявності катіонів міді зумовлено їх активуючим впливом на активність алкангідроксилази АлкБ типу (ферменту, що здійснює окиснення вуглеводнів) досліджуваних штамів.

Пізніше [9] було показано, що за наявності невисоких концентрацій Cu^{2+} (0,01—0,05 мМ) і культуральної рідини штамів ІМВ В-7241, ІМВ Ас-5017 та ІМВ В-7405 ступінь деструкції нафти у воді та ґрунті через 20 діб був на 15—25% вищим, ніж без катіонів міді. У [9] ми припустили, що інтенсифікація розкладання нафти за наявності катіонів міді може бути зумовлена їх стимулювальним впливом на активність алкангідроксилаз як штамів-продукентів ПАР, так і природної (автохтонної) нафтоокиснювальної мікробіоти.

Дані попередніх досліджень [8; 9] дали змогу висловити припущення про те, що ефективність розкладання нафти можна підвищити, використовуючи культуральну рідину, одержану після вирощування штамів *A. calcoaceticus* ІМВ В-7241, *R. erythropolis* ІМВ Ас-5017 і *N. vaccinii* ІМВ В-7405 за наявності Cu^{2+} . Подальші експерименти підтвердили це припущення (табл. 2—5).

Дані, наведені у табл. 2, показали, що у разі обробки води препаратами ПАР штаму ІМВ В-7241, синтезованих за внесення у середовище з етанолом і гексадеканом катіонів міді, ступінь деструкції нафтових забруднень (у тому числі й комплексних з важкими металами) був на 8—13% вищим порівняно з показниками за наявності препаратів, одержаних на обох субстратах без додавання Cu^{2+} . Крім того, ці результати узгоджуються з попередніми [9] про інтенсифікацію розкладання нафти за одночасної наявності у воді ПАР і катіонів міді.

Таблиця 2. Вплив культуральної рідини, одержаної в різних умовах культивування *A. calcoaceticus* ІМВ В-7241, на деструкцію комплексних з Cu^{2+} нафтових забруднень у воді

Джерело вуглецю у середовищі культивування	Концентрація Cu^{2+} (мМ) у середовищі культивування	Деструкція нафти (%) у воді за наявності Cu^{2+} (мМ)		
		0	0,1	0,5
Етанол	0	70	83	80
	0,1	82	95	93
	0,5	80	91	90
Гексадекан	0	75	88	85
	0,5	85	96	95

Примітки. Концентрація нафти у воді становила 4 г/л. Експозиція — 20 діб.

У табл. 3 наведено результати деструкції нафти за наявності суміші важких металів ($\text{Cu}^{2+} + \text{Cd}^{2+} + \text{Pb}^{2+}$) у воді після обробки препаратами ПАР,

синтезованими *A. calcoaceticus* ІМВ В-7241 на рідких парафінах та етанолі (з внесенням 0,5 мМ Cu^{2+} і без катіонів міді).

Таблиця 3. Деструкція нафти у воді за наявності Cu^{2+} , Cd^{2+} і Pb^{2+} і культуральної рідини *A. calcoaceticus* ІМВ В-7241

Концентрація катіонів у воді, мМ			Деструкція нафти (%) після обробки культуральною рідиною, одержаною після вирощування на		
Cu^{2+}	Pb^{2+}	Cd^{2+}	рідких парафінах	етанолі	етанолі з внесенням 0,5 мМ Cu^{2+}
0,5	0,1	0,1	92	80	88
0,5	0,1	0,5	92	78	87
0,5	0,5	0,1	90	73	85
0,5	0,5	0,5	90	70	85
0	0	0	93	82	90

Примітки. Концентрація нафти у воді становила 4 г/л. Експозиція — 30 діб.

Встановлено, що додавання катіонів міді у середовище з етанолом супроводжувалося утворенням ПАР, за наявності яких рівень деструкції комплексних з важкими металами нафтових забруднень у воді підвищувався на 8—15% порівняно з показниками, встановленими для ПАР, синтезованих на етанолі без Cu^{2+} , і був усього на 3—5% нижчим, ніж за наявності ПАР, одержаних на рідких парафінах (табл. 3).

Наступні експерименти показали, що ступінь деструкції нафти, а також комплексних з важкими металами нафтових забруднень у воді після обробки препаратами ПАР, синтезованих *R. erythropolis* ІМВ Ас-5017 у середовищі з етанолом (відпрацьованою олією) і 0,1 мМ Cu^{2+} , був на 7—11% вищим порівняно з використанням ПАР, утворюваних на цих субстратах без внесення у середовище культивування катіонів міді (табл. 4).

Таблиця 4. Деструкція нафти у воді, що містить кілька токсичних металів, за наявності ПАР, синтезованих у різних умовах культивування *R. erythropolis* ІМВ Ас-5017

Катіони металів у забрудненій нафтою воді	Деструкція нафти (%) після обробки культуральною рідиною, одержаною після вирощування на			
	етанолі	етанолі з внесенням 0,1 мМ Cu^{2+}	відпрацьованій олії	відпрацьованій олії з внесенням 0,1 мМ Cu^{2+}
Без катіонів	50	60	50	57
$\text{Cu}^{2+} + \text{Cd}^{2+} + \text{Pb}^{2+}$	70	81	67	78
$\text{Cu}^{2+} + \text{Cd}^{2+}$	65	75	65	78
$\text{Cu}^{2+} + \text{Pb}^{2+}$	63	75	62	73
Cu^{2+}	75	85	70	81

Примітки. Концентрація нафти у воді становила 2,6 г/л. Експозиція — 17 діб. Концентрація кожного з катіонів металів у забрудненій воді 0,01 мМ.

Схожі результати були одержані під час дослідження деструкції нафтових забруднень у ґрунті за наявності культуральної рідини після вирощування *R. erythropolis* ІМВ Ас-5017 гексадекані і відпрацьованій олії з внесенням 0,1 мМ Cu^{2+} в експоненційній фазі росту (табл. 5).

Таблиця 5. Вплив культуральної рідини, одержаної в різних умовах культивування *R. erythropolis* ІМВ Ас-5017, на деструкцію комплексних з важкими металами нафтових забруднень у ґрунті

Джерело вуглецю у середовищі культивування	Суміш металів у ґрунті	Ступінь деструкції нафти (%)
Гексадекан	Без металів	70
Гексадекан (з внесенням 0,1 мМ Cu^{2+})	Без металів	77
	$\text{Cu}^{2+} + \text{Cd}^{2+} + \text{Pb}^{2+}$	88
	$\text{Cu}^{2+} + \text{Cd}^{2+}$	95
	$\text{Cu}^{2+} + \text{Pb}^{2+}$	99
Відпрацьована олія	Без металів	63
Відпрацьована олія (з внесенням 0,1 мМ Cu^{2+})	Без металів	71
	$\text{Cu}^{2+} + \text{Cd}^{2+} + \text{Pb}^{2+}$	67
	$\text{Cu}^{2+} + \text{Cd}^{2+}$	90
	$\text{Cu}^{2+} + \text{Pb}^{2+}$	92

Примітки. Концентрація нафти у ґрунті 20 г/кг, концентрація Cu^{2+} 0,1 мМ, Cd^{2+} і Pb^{2+} — 0,01 мМ. Експозиція — 20 діб.

Так, ступінь розкладання нафти у ґрунті (без металів) після обробки ПАР, одержаними на гексадекані і відпрацьованій олії, становив 70 і 63% відповідно, а за наявності препаратів, синтезованих на середовищі з внесенням в експоненційній фазі росту штаму ІМВ Ас-5017 катіонів міді, підвищувався до 77 і 71% відповідно. Крім того, за наявності культуральної рідини після вирощування *R. erythropolis* ІМВ Ас-5017 у цих умовах культивування (з доданням Cu^{2+}) деструкція комплексних з важкими металами нафтових забруднень у ґрунті досягала 67—99% (табл. 5). Зазначимо, що ступінь розкладання таких забруднень у разі обробки ґрунту препаратами ПАР, одержаними на гексадекані, був вищим (88—99%), ніж за наявності ПАР, синтезованих на відпрацьованій олії (67—92%). Ці дані узгоджуються з наведеними у табл. 1—3 і дають змогу зробити висновок про те, що під час культивування на гексадекані або рідких парафінах клітини продуцентів ПАР адаптуються до споживання вуглеводнів нафти.

Разом з тим дані, наведені у табл. 2—5, засвідчують, що внесення катіонів міді у середовище з неуглеводневими субстратами (етанол, відпрацьована олія) дає змогу попередньо адаптувати мікробні клітини до розкладання нафти завдяки, ймовірно, завдяки активуючому впливу Cu^{2+} на алкангідроксилазу штамів-продуцентів ПАР.

В опублікованому нами раніше огляді літератури [1] детально описано шляхи використання ПАР у природоохоронних технологіях. Аналізуючи дані літератури, що не увійшли у цей огляд, можна зробити висновок, що переважна їх більшість стосується виділення нових штамів-деструкторів нафти, які синтезують ПАР [10—14]. Так, у [10] повідомляється про виділення з Персидської затоки та Каспійського моря 25 штамів бактерій, які на основі аналізу 16S рРНК ідентифіковані як представники родів *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Gordonia*, *Rhodococcus*, *Cobetia*, *Halomonas*, *Alcanivorax*, *Mari-nobacter* і *Microbacterium*. Штами-продуценти ПАР *Acinetobacter calcoacet-ticus* BS і *Alcanivorax dieselolei* PG-12 виявилися найактивнішими деструкто-

рами нафти: за умов росту на середовищі з нафтою через 7 діб ступінь її споживання становив 82 і 71% відповідно [10]. У процесі культивування упродовж 7 діб на середовищі з 1% нафти *Bacillus subtilis* A1 асимілював 87% цього субстрату [11]. Встановлено здатність штаму A1 до синтезу ПАР ліпопептидної природи, причому максимальна концентрація ПАР (4,85 г/л) спостерігалася за умов росту бактерій на середовищі із 3% сахарози. Ізольований із забруднених нафтою зразків ґрунту штам *Pseudomonas aeruginosa* PG1 метаболізував упродовж 5 тижнів на 68—74% такі важкодоступні компоненти нафти (2%), як нафтален, флуорен, фенатрен, антрацен, причому ріст штаму PG1 на нафті супроводжувався синтезом рамноліпідних ПАР [12].

Крім того, рамноліпіди вважаються перспективними агентами для використання у процесах видалення катіонів металів з екосистем. Так, ПАР *Pseudomonas aeruginosa* видаляли до 95% Cr^{+3} (початкова концентрація 40 ppm) з водних розчинів за 5 хв за рахунок флотації [13]. Іншими досліджуваними ПАР гліколіпідної природи були вторинні метаболіти *Burkholderia* sp. Z-90, які за рахунок утворення комплексу «ПАР-катіон металу» видаляли 44,0% Zn, 32,5% Pb, 52,2% Mn, 37,7% Cd, 24,1% Cu та 31,6% As з ґрунту [14].

Проте зазначимо, що у доступній літературі нам не вдалося знайти відомостей про дослідження впливу мікробних ПАР, синтезованих у різних умовах культивування продуцента, на деструкцію як нафти, так і комплексних з важкими металами нафтових забруднень.

Висновок

У результаті проведеного дослідження встановлено, що незалежно від природи джерела вуглецю у середовищі культивування *A. calcoaceticus* ІМВ В-7241, *R. erythropolis* ІМВ Ас-5017 і *N. vaccinii* ІМВ В-7405 синтезовані ПАР інтенсифікували процеси розкладання нафти у воді і ґрунті, у тому числі й за наявності важких металів. Ступінь деструкції нафти під впливом ПАР, синтезованих на промислових відходах, був дещо нижчим (70—90%), ніж за використання вуглеводневих субстратів (90—95%), проте нижча собівартість цільового продукту зумовлює вищу ефективність використання таких ПАР у природоохоронних технологіях. Внесення Cu^{2+} (0,1—0,5 мМ) в експоненційній фазі росту штамів ІМВ В-7241 і ІМВ Ас-5017 на неуглеводневих субстратах супроводжувалося утворенням ПАР, що характеризувалися однаковою з синтезованими на гексадекані і рідких парафінах здатністю до розкладання нафтових забруднень.

Література

1. Pirog T.P., Konon A.D., Savenko I.V. Microbial surfactants in environmental technologies. *Biotechnologia acta*. 2015, 8(4), 21—39. doi: 10.15407/biotech8.04.021.
2. Zaki M.S., Fawzi O.M., Abd EL-Zaher M.F. Bioremediation of contaminants. *Life Sci. J.* 2013, 10(1), 3329—3332.
3. Tyagi M., da Fonseca M.M., Carvalho C.C. Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. *Biodegradation*. 2011, 22(2), 231—241.
4. Ławniczak Ł., Marecik R., Chrzanowski Ł. Contributions of biosurfactants to natural or induced bioremediation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2013, 97(6), 2327—2339.

5. Пирог Т.П., Софилканич А.П., Гриценко Н.А. Деструкция нефтяных загрязнений в присутствии поверхностно-активных веществ *Acinetobacter calcoaceticus* IMB В-7241, *Rhodococcus erythropolis* IMB Ас-5017 и *Nocardia vaccinii* IMB В-7405. Биотехнология. Теория и практика. 2015, 2, 42–50. doi: 10.11134/btp.2.2015.5
6. Pirog T. P., Panasyuk E. V., Antonyuk N. A. Impact of microbial *Nocardia vaccinii* IMB В-7405 surfactants on oil destruction in water. J. Water Chem. Technol. 2016, 38(5), 301—306. doi:10.3103/S1063455X1605009X.
7. Pirog T.P., Savenko I.V., Lutsay D. A. Microbial surface-active substances as antiadhesive agents. *Biotechnologia acta*, 2016; 9(3): 7—22. doi: org/10.15407/biotech9.03.007.
8. Пирог Т.П., Конон А.Д., Софилканич А.П., Шевчук Т.А., Парфенюк С.А. Влияние Cu^{2+} на синтез поверхностно-активных веществ *Acinetobacter calcoaceticus* IMB В 7241 и *Rhodococcus erythropolis* IMB Ас-5017. Микробиол. журнал. 2013; 75(1): 3—13.
9. Пирог Т.П., Конон А.Д., Софилканич А.П., Шевчук Т.А., Нутинская Г.А. Деструкция нефти в присутствии Cu^{2+} и поверхностно-активных веществ *Acinetobacter calcoaceticus* IMB В-7241, *Rhodococcus erythropolis* IMB Ас-5017 и *Nocardia vaccinii* IMB В-7405. Микробиол. журнал. 2015; 77(2): 2—8.
10. Hassanshahian M., Emtiazi G., Cappello S. Isolation and characterization of crude-oil-degrading bacteria from the Persian Gulf and the Caspian Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 2012; 64(1):7—12. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.11.006.
11. Parthipan P., Preetham E., Machuca L.L., Rahman P.K., Murugan K., Rajasekar A. Biosurfactant and degradative enzymes mediated crude oil degradation by bacterium *Bacillus subtilis* A1. *Front. Microbiol.* 2017; 8:193. doi: 10.3389/fmicb.2017.00193.
12. Patowary K., Patowary R., Kalita M.C., Deka S. Characterization of biosurfactant produced during degradation of hydrocarbons using crude oil as sole source of carbon. *Front. Microbiol.* 2017; 8:279. doi: 10.3389/fmicb.2017.00279.
13. Salmani Abyaneh A., Fazaalipoor M.H. Evaluation of rhamnolipid (RL) as a biosurfactant for the removal of chromium from aqueous solutions by precipitate flotation. *J. Environ. Manage.* 2016; 165:184-7. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.09.034.
14. Yang Z., Zhang Z., Chai L., Wang Y., Liu Y., Xiao R. Bioleaching remediation of heavy metal-contaminated soils using *Burkholderia* sp. Z-90. *J. Hazard. Mater.* 2016; 301:145—52. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.08.047.