

СЕКЦІЯ 2. СУЧАСНИЙ СТАН І РОЗВИТОК ПРИРОДНИЧИХ НАУК

Крусір Галина Всеволодівна

д.т.н., проф., завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій
Одеського національного технологічного університету

Купріяшкіна Олена Володимирівна

аспірант 1-го року навчання кафедри екології та природоохоронних технологій Одеського національного технологічного університету, начальник служби екології та природних ресурсів ПРАТ «ЧОРНОМОРСЬКИЙ ПАЛИВНИЙ ТЕРМІНАЛ», АТ «ОДЕСНАФТОПРОДУКТ»

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МІКРООГРАНІЗМІВ ДЕСТРУКТОРІВ З МЕТОЮ ОЧИЩЕННЯ НАФТОВІСНИХ СТІЧНИХ ВОД

З кожним роком проблема захисту навколишнього середовища стає більш актуальною, що преш за все пов'язано з бурхливим розвитком промисловості. Одночасно з цим все більше уваги приділяється охороні навколишнього середовища, включаючи впровадження нормативних та законодавчих документів щодо контролю екосистем. Серед речовин, забруднюючих океани, моря, озера і річкові землі, одне з перших місць належить нафті та нафтопродуктам [1].

Одним із найбільш поширеним антропогенним забруднюючим фактором являються нафтовмісні стічні води. Вуглеводні нафти відносяться до токсикантів глобальної поширеності. Форми знаходження, поведінки нафти в морському середовищі й її вплив на водні екосистеми дуже складні, різноманітні і динамічні через багатокомпонентність нафти. З еколого-токсикологічної точки зору нафта представляє груповий токсикант неспецифічної дії. У сирій нафті виявлено понад 17 000 органічних сполук, які можна розділити на чотири основні категорії: парафіни, ароматичні речовини, асфальтени і смоли [2]. Серед них парафіни – це насичені лінійні ланцюги, починаючи від одного вуглецю (метану) та закінчуючи восками, що містять 40 вуглецевих ланцюгів. Ароматичні вуглеводні являють собою бензольні кільця, що містять алкільні групи. Всі ароматичні вуглеводні містять принаймні одне бензольне кільце, яке є ненасиченими кільцями, які

легко вступають в реакції через відсутність у них водню. Також ароматичні вуглеводні є надзвичайно складними через високу молекулярну масу, міцні молекулярні зв'язки, гідрофобність та низьку розчинність і воді [3]. Тому нафтова галузь генерує фізичні та хімічно складні нафтові стічні води, які потребують різних стратегій очищення, включаючи інноваційний ефективний підхід.

З відкриттям перших бактерій, що розкладають вуглеводні, було виявлено понад 175 родів нафодеструкторів. Такі бактерії як *Proteobacteria*, *Flexibacter-Cytophaga-Bacteroides*, *Actinobacteria* та *Cyanobacteria*, були виділені із різних середовищ, і була підтверджена їх ефективність у метаболізмі вуглеводнів. Зарубіжні дослідники Ху та співавтори (2018) узагальнили основні напрями біодеградації нафтових вуглеводнів різними бактеріями як показано в табл. 1.

Табл. 1. Напрями біодеградації нафтових вуглеводнів бактеріями

Вуглеводневі компоненти нафти	Види бактерій	Основний напрям деградації
Аліфатичні	<i>Dietzia sp.</i>	н-алкани (C6-C40)
	<i>Pseudomonas sp.</i>	н-алкани (C14-C30)
	<i>Oleispira antartica</i>	н-алкани (C10-C18)
	<i>Rhodococcus ruber</i>	н-алкани (C13-C17)
	<i>Geobacillus thermodenitrifican</i>	н-алкани (C15-C36)
	<i>Rhodococcus sp.</i>	циклогексан
	<i>Alcanivorax sp.</i>	н-алкани та розгалужені алкани
	<i>Gordonia sihwensis</i>	Розгалужені та нормальні алкани
	<i>Achromobacter xylosoxidans</i>	моно-/поліароматика
	<i>Aeribacillus pallidus</i>	моно-/поліароматика
Ароматичні	<i>Mycobacterium cosmeticum</i>	моноароматика
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	моноароматика
	<i>Cecloclasticus</i>	полиароматика
	<i>Neptunomonas naphthovorana</i>	полиароматика
	<i>Bacillus Licheniformis</i>	полиароматика
	<i>Bacillus Mojavensis</i>	полиароматика
	<i>Sphingomonas, Sphingobium and Novosphingobium</i>	полиароматика
Смоли та асфальтени	<i>Pseudomonas sp.</i>	смоли
	<i>Pseudomonas sp.</i>	асфальтени
	<i>Bacillus sp.</i>	асфальтени
	<i>Citrobacter</i>	асфальтени
	<i>Enterobacter sp.</i>	асфальтени
	<i>Staphylococcus sp.</i>	асфальтени
	<i>Lysinibacillus sp.</i>	асфальтени
	<i>Pseudomonas sp.</i>	асфальтени

Кожен штам здатний метаболізувати певний тип вуглеводнів [4].

Більшість бактерій в одному роді можуть розкласти лише один невеликий спектр вуглеводнів зі схожою структурою. Аналізуючи дані таблиці 1 можна зробити висновок, що один рід може метаболізувати алкани з різною довжиною ланцюга, а інший – ароматичні вуглеводні з подібними характеристиками. Також можна зробити висновок, що один штам або рід бактерій не може розкласти всі компоненти нафти через її складність. Тому ефективна біодеградація різних вуглеводнів, що містяться в нафтовмісних стічних водах, передбачає наявність змішаної популяції вуглеводневих метаболізуючих бактерій з відповідними можливостями до змін навколишнього середовища в межах діапазону для сприятливої активності мікроорганізмів.

Найголовніше, перш ніж бактерії почнуть метаболізувати вуглеводні, вони повинні мати до них легкий доступ. Біосурфактанти є життєво важливими речовинами, які підвищують ефективність, з якою бактерії поглинають нафтові вуглеводні [5]. Спочатку бактерія повинна прикріпитися до краплі нафти за допомогою джгутиків. Потім вони виділяють біологічно активні речовини різних молекулярних розмірів і хімічної природи, які емульгують краплю нафти, збільшуючи площу поверхні нафти і води та її розчинність. Виробництво бактеріально біологічних активних речовин є природним, нетоксичним і біологічно розкладається, і є економічно ефективним методом для сприяння розчиненню нафтових стічних вод під час біодеградації. Після того, як бактерії розчиняють нафту, вони можуть поглинути та метаболізувати вуглеводні.

Кисень активізує аеробний шлях деградації алканів, тому n-алкани, що складаються з двох або більше атомів вуглецю, зазвичай розкладаються спочатку шляхом окиснення кінцевої метильної групи утворенням первинного спирту для кінцевого окиснення [5]. Потім первинний спирт далі окислюється з утворенням відповідних альдегідів, а потім перетворюється на жирну кислоту. Слідом жирні кислоти з'єднуються з КоА і піддаються β -окисненню з утворення ацетил-КоА. Окиснення субтермільних алканів відбувається шляхом перетворення алканових груп у вторинні спирти та перетворення їх у кетони. Потім монооксигенеза Байєра-Віллігера окислює його з утворенням складного ефіру. Моноксигенези – це ферменти, що активують алкани, які можуть подолати низьку хімічну реакційну здатність вуглеводнів шляхом продукування активних форм кисню. Наприклад, при окисненні метану він перетворюється на метанол, потім послідовно перетворюється на формальдегід і, нарешті, на мурашину кислоту. Новоутворена мурашина кислота може бути перетворена в CO_2 або включена

в біосинтез багато карбонових сполук через різні шляхи в залежності від мікроорганізму.

Поліароматичні вуглеводні в нафті надзвичайно стійкі до біологічного розкладу завдяки притаманній їм стабільності ароматичних кілець. Поліароматичні вуглеводні досить токсичні, канцерогенні та стійкі стосовно забруднення навколишнього середовища. Вони складаються з двох або більше кілець з різним відгалуженням метичних груп. Деякі відомі бактерії, які мають здатність метаболізувати поліароматичні вуглеводні, належать до роду *Arthrobacter*, *Burkholderia*, *Mycobacterium*, *Pseudomonas*, *Sphingomonas* та *Rhodococcus* [7].

Нафтени представляють собою найпростіші поліциклічні ароматичні сполуки, до складу яких входять такі вихідні сполуки, як циклопентан, циклогексан, і декалін, а також їх алкільні аналоги. Вони складаються з двох злитих бензольних кілець. Тому одним із шляхів розщеплення бактеріями цього компоненту є окиснення нафталіну за допомогою монооксигенезної та діоксигенезної атаки ароматичного кільця з утворенням проміжних сполук дигідроїдролу. Бактерії використовують діоксигенезну реакцію для окиснення нафталіну до дигідронафталіну, потім фермент дегідрогенеза використовується для каталізу попереднього проміжного продукту. Потім дигідроксильовані поліароматичні вуглеводні піддаються розщепленню шляхом розриву ароматичного кільця з утворенням карбоксильних сполук, які в подальшому окислюються ферментами та спрямовуються в цикл трикарбонових кислот. [8]

Вуглеводні нафти – небезпечні забруднювачі довкілля, які можуть тривалий час зберігатися, мігрувати і накопичуватись у біотопах, тим самим згубно діючи на живі організми, зокрема, і на організм людини. Очищення нафтовмісних стічних вод від забруднення можливо за участю мікроорганізмів. Модифікаційна мінливість бактерій дає змогу їм пристосовуватись до використання та подальшого розкладання різноманітних сполук нафти, у тому числі і сполук з ароматичним бензольним ядром.

Біодеструкція нафти та нафтопродуктів є альтернативою більш дорогим вартісним хімічним методам очищення довкілля. Вище наведенні дані підтверджують актуальність досліджень щодо пошуку біологічних способів очищення забруднених водних біотопів від нафтовмісних стічних вод за участю мікроорганізмів.

Список використаних джерел:

1. Білокопитов Ю., Міцкевич А. Проблема очищення поверхневих і стічних вод від нафтопродуктів. *Наукові праці. Техногенна безпека*. 2013. Вип. 198., Том 210. 147 с.
2. Wang H., Wwang B., Dong W., Hu X. 2016 Co-acclimation of bacterial communities under stresses of hydrocarbons with different structures. [CrossRef][PubMed]
3. Ubani O., Atagana I.H., Thantsha S.M. Biological degradation of oil sludge: A review of the current state of development. 2013. № 12. P. 6544-6567. [CrossRef]
4. Godfrin M.P. Sihlabela M., Bose A., Tripathi A., Behavior of Marine Bacteria in Clean Environment and Oil Spill Conditions. *Langmuir* 2018, № 34. 9047-9053. [CrossRef]
5. Xu X., Liu W., Tian S., Wang W., Qi Q., Jiang P., Gao X., Li F., Yu H., Petroleum Hydrocarbon-Degrading Bacteria for the Remediation of oil Pollution under aerobic conditions: A perspective analysis. *Front. Microbiol.* 2018. № 9. 2885.
6. Joanna Brzeszcz J., Kaszycki P., Aerobic bacteria degrading both n-alkanes and aromatic hydrocarbons: an undervalued strategy for metabolic diversity and flexibility. *Biodegradation*. 2018. № 29. P. 359-407. [PubMed];
7. Brooijmans R.J.W., Pastink M.I., Siezen R.J.. Hydrocarbon-degrading bacteria: The oil-spill clean-up crew: Genomics update. *Microb. Biotechnol.* 2009. № 2. P. 587-59.
8. Travkin V.M., Solyankova I.P, Salicylate or phthalate: the main intermediates in the bacterial degradation of naphthalene. *Processes* 2021. № 9. 1862.