

ПОШУК ПЕРСПЕКТИВНИХ ВИДІВ ДРІЖДЖІВ, ЗДАТНИХ ЗБРОДЖУВАТИ КСИЛОЗУ, ДЛЯ МАСШТАБОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ

Антоненко Д.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», antonenko.daria@iill.kpi.ua

Abstract: This review explores natural xylose-fermenting yeast strains, such as *Spathaspora passalidarum*, *Ogataea polymorpha*, *Pachysolen tannophilus*, and *Scheffersomyces stipitis*, highlighting their potential for industrial bioethanol production, noting each yeast species' distinct advantages and limitations.

Keywords: bioethanol, xylose fermenting yeasts, lignocellulosic waste.

Вступ. Біоетанол – відомий як можлива альтернатива викопному паливу, вже давно привертає значну увагу дослідників за рахунок використання відновлюваних ресурсів для біосинтезу. Один з можливих шляхів його вироблення – зброджування цукрів, отриманих з біомаси, наприклад лігноцелюлозних матеріалів [1]. Однак, ефективне використання ксилози, основного компонента лігноцелюлозної біомаси, що складає 30–40% від всієї маси [2], залишається проблемою у виробництві біоетанолу. Одночасне використання біологічними агентами глюкози та ксилози з лігноцелюлозної біомаси ускладнене через репресію, спричиненою глюкозою, також відомою як вуглецева катаболітна інактивация. Це пригнічення виникає внаслідок пріоритетного використання мікроорганізмами глюкози перед ксилозою, що ускладнює одночасне споживання обох цукрів. У той час як *Saccharomyces cerevisiae*, вид дріжджів, який переважає у виробництві етанолу, не має природної здатності споживати ксилозу, останні досягнення в метаболічній та еволюційній інженерії привели до створення рекомбінантних штамів *S. cerevisiae*, які ферментують ксилозу [3]. До того ж, в останні роки також було приділено увагу вивченню метаболізму ксилози іншими дріжджами, які мають потенціал у збільшенні ефективності ферментації ксилози [4].

Метою нашої роботи є аналіз літературних даних з пошуку природних видів дріжджів здатних зброджувати ксилозу, що мають потенціал для запровадження їх у виробництво біоетанолу.

Матеріали та методи. Цей огляд літератури підготовлено на основі аналізу наукових публікацій, звітів та статей у наукових журналах. Дослідження використання різних видів продуцентів проведено шляхом аналізу літератури за допомогою міжнародних систем цитування та баз даних, як Scopus, PubMed, та Google Scholar.

Результати та обговорення. Екологічна ніша природних видів дріжджів, що здатні ферментувати ксилозу, є доволі специфічною, і загалом характеризується наявністю лігноцелюлози. Прикладами таких середовищ існування є гнила та мертва деревина та кишківники деревоїдних комах.

Spathaspora passalidarum – вид дріжджів, виявлених в кишківнику деревоїдних жуків – розглядається як один з перспективних кандидатів для

використання в промисловості, здатний до ферментування ксилози. *S. passalidarum* демонструє високий вихід етанолу, швидку клітинну проліферацію та ефективне використання ксилози в анаеробних умовах, яка є пріоритетом після виснаження глюкози [5]. Інші ж дослідження описують одночасне використання глюкози, ксилози та целобіози як джерел вуглецю [6].

Тим не менш, *Spathaspora passalidarum* має певні обмеження, включаючи низьку толерантність до етанолу та інших інгібіторів, отриманих після обробки лігноцелюлозних матеріалів, а також жорсткі умови культивування, необхідні для підтримки ефективності бродіння ксилози [7]. Вирішення проблем, пов'язаних з ендометаболікою під час ферментації геміцелюлозного гідролізату, залишається складним питанням для біоетанолу другого покоління.

Вид *Ogataea polymorpha* привернув увагу дослідників завдяки присутності певних молекулярних білків, включаючи гексозний транспортер Hxs1 та активатор транскрипції ензиму Azf1, що беруть участь у сприйнятті вуглеводів. Ці білки є важливими для ферментації ксилози та глюкози, що вказує на придатність цих дріжджів для розробки передових методів виробництва етанолу з лігноцелюлози. Ще одна помітна перевага представників виду *O. polymorpha* полягає в їх здатності витримувати високі температури, що дає змогу виробляти етанол з різних цукрів, які містяться в лігноцелюлозній біомасі, за таких умов. Ця особливість позиціонує даний вид як цінного кандидата для промислового виробництва біоетанолу, особливо в процесах, що вимагають підвищених температур бродіння [7].

Pachysolen tannophilus – вид дріжджів, який відомий своєю винятковою адаптивністю – демонструє стійкість до коливань температури, рівня рН, концентрації D-ксилози, а також має підвищену стійкість до етанолу та інших інгібіторів, пов'язаних з бродінням. Крім того, дослідження виявили здатність цих дріжджів до швидкого споживання D-ксилози та ферментування глюкози та целобіози. Завдяки його підвищеній ферментативній здатності та невибагливості, цей вид визначений як перспективний претендент для впровадження у виробництво біоетанолу [8].

Вид дріжджів *Scheffersomyces stipitis*, раніше відомий як *Pichia stipitis*, має численні переваги, які роблять його перспективним претендентом на виробництво біоетанолу. *S. stipitis* демонструє чудову здатність обходити глюкозну репресію утилізації ксилози – промислово важливу рису для ефективного бродіння гідролізатів целюлози. Ця особливість позиціонує вид *S. stipitis* як ідеального кандидата для запровадження у великомасштабне виробництво біоетанолу – завдяки можливості використовувати ксилозу разом із глюкозою, забезпечуючи оптимальне використання наявних ресурсів.

Окрім ферментативної здатності, природне середовище проживання *S. stipitis* у лігноцелюлозних субстратах підкреслює придатність виду для процесів біоконверсії. Дослідження нетрадиційних дріжджів, знайдених у гнилій деревині, підкреслили поширеність представників *S. stipitis*, а також гідролітичні здібності та здатність до ксилозного бродіння у даного виду. Ця природна

спорідненість із лігноцелюлозними середовищами підкреслює потенціал *S. stipitis* для виробництва біоетанолу [9].

Нещодавно в Україні з гнилої деревини вперше виділили штам *Scheffersomyces stipitis*, який показав високий вихід біоетанолу [10], що дає змогу розглядати його як кандидата для застосування в промисловості. Знаходження нових диких штамів дріжджів не тільки відкриває можливості для поліпшення ефективності процесу біосинтезу етанолу, але й дає змогу краще зрозуміти ареали їх розповсюдження. Таким чином, наявність *S. stipitis* в Україні цікава крім біотехнологічного застосування, ще й перспективою подальших знахідок нових штамів дріжджів, здатних зброджувати ксилозу.

Висновки. Таким чином, дослідження нових видів дріжджів що здатні зброджувати ксилозу, все ще тривають, деякі з уже відомих видів, зокрема *Spathaspora passalidarum*, *Ogataea polymorpha*, *Pachysolen tannophilus* і *Scheffersomyces stipitis*, мають значний потенціал для використання в промисловому виробництві біоетанолу через їхню здатність ефективно ферментувати ксилозу та інші цукри, що містяться в лігноцелюлозних матеріалах. Кожен з цих видів дріжджів має свої переваги та обмеження, які варто досліджувати детальніше для покращення виходу продукту шляхом оптимізації умов культивування.

Список використаної літератури:

1. Zhang W., Geng A. Improved ethanol production by a xylose-fermenting recombinant yeast strain constructed through a modified genome shuffling method. *Biotechnology for biofuels*. 2012. Т. 5, № 1. С. 46. URL: <https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-46> (дата звернення: 25.04.2024).
2. Su B., Song D., Zhu H. Metabolic engineering of *saccharomyces cerevisiae* for enhanced carotenoid production from xylose-glucose mixtures. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. 2020. Т. 8. URL: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00435>
3. Rational and evolutionary engineering approaches uncover a small set of genetic changes efficient for rapid xylose fermentation in *saccharomyces cerevisiae* / S. R. Kim та ін. *PLoS ONE*. 2013. Т. 8, № 2. С. e57048. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057048>
4. Selim K. A., Easa S. M., El-Diwany A. I. The xylose metabolizing yeast *spathaspora passalidarum* is a promising genetic treasure for improving bioethanol production. *Fermentation*. 2020. Т. 6, № 1. С. 33. URL: <https://doi.org/10.3390/fermentation6010033>
5. Cofermentation of glucose, xylose, and cellobiose by the beetle-associated yeast *spathaspora passalidarum* / T. M. Long та ін. *Applied and environmental microbiology*. 2012. Т. 78, № 16. С. 5492—5500. URL: <https://doi.org/10.1128/aem.00374-12>
6. Hou X. Anaerobic xylose fermentation by *Spathaspora passalidarum*. *Applied microbiology and biotechnology*. 2011. Т. 94, № 1. С. 205—214. URL: <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3694-4>
7. Comparative genomics of xylose-fermenting fungi for enhanced biofuel production / D. J. Wohlbach та ін. *Proceedings of the national academy of sciences*. 2011. Т. 108, № 32. С. 13212—13217. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1103039108>
8. Optimization of parameters of alcohol fermentation of xylose-containing inedible substrates using the yeast *Pachysolen Tannophilus* / Y. Bazarnova та ін. *MATEC web of conferences*. 2018. Т. 245. С. 18006. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824518006>
9. Cofermentation of glucose, xylose, and cellobiose by the beetle-associated yeast *spathaspora passalidarum* / T. M. Long та ін. *Applied and environmental microbiology*. 2012. Т. 78, № 16. С. 5492—5500. URL: <https://doi.org/10.1128/aem.00374-12>
10. Application of natural fungi in bioconversion of lignocellulosic waste to second-generation ethanol / M. Fomina та ін. *Biosystems diversity*. 2024. Т. 32, № 1. С. 45—59. URL: <https://doi.org/10.15421/012405>