

КІНЕТИКА ТА ЕНЕРГЕТИКА СПОСОБІВ СУШІННЯ ВАРЕНОГО РИСУ

Терзісв С. Г., д.т.н., доц., Безбах І. В., д.т.н., доц., Тараненко Є. Ю., аспірант, Безбах С. В., аспірант, Казани В. З., аспірант
Одеський національний технологічний університет

Анотація. У роботі проведено експериментальні дослідження кінетики процесу зневоднення та оцінено енергетичну ефективність різних способів сушіння вареного рису. Розглянуто три типи термообробки: мікрохвильове (НВЧ), інфрачервоне (ІЧ) та мікрохвильове сушіння у вакуумі. Проаналізовано вплив попередніх технологічних операцій — варіння та пропарювання — на інтенсивність видалення вологи, тривалість процесу й питомі енерговитрати. Встановлено, що використання інфрачервоного випромінювання забезпечує найвищу швидкість випаровування вологи завдяки глибокому прогріву зерна, тоді як вакуумне мікрохвильове сушіння характеризується найменшими питомими енерговитратами через зниження температури кипіння води та ефективне використання енергії поля. Порівняльний аналіз показав, що поєднання ІЧ та НВЧ впливу дає змогу оптимізувати процес зневоднення, зменшити тривалість сушіння і водночас зберегти структурну цілісність та колір продукту. На основі отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо оптимізації лабораторних режимів термообробки рису, які забезпечують рівномірний розподіл температури в шарі матеріалу, запобігають перегріву та сприяють зменшенню енергетичних втрат, а також можуть бути використані для планування промислових технологій сушіння зернових культур з підвищеною енергоефективністю. Отримані дані можуть знайти застосування при розробленні енергоощадних технологій сушіння зернових продуктів у харчовій промисловості та під час оптимізації процесів зберігання та переробки продукту на лабораторному і промисловому рівнях.

Ключові слова: рис, сушіння, мікрохвильова енергія, інфрачервоне випромінювання, енергетична ефективність, кінетика.

Вступ. Технологічна обробка зернових культур – ключовий етап у виробництві харчових продуктів, що значною мірою визначає їхню якість, харчову цінність та енергетичні витрати виробництва. Особливе місце серед зернових займає рис, який є базовим продуктом харчування для мільярдів людей у світі. Процес приготування вареного рису – комплекс фізико-хімічних і біотехнологічних перетворень, що включають гідратацію зерна, желатинізацію крохмалю, денатурацію білків та трансформацію смакових і ароматичних сполук. Ці процеси супроводжуються інтенсивним тепло- та масообміном і мають складну кінетику, від якої залежить як технологічна якість продукту (структура зерен, ступінь розварювання, щільність, текстура, смак), так і енергетична ефективність способу обробки.

Останні десятиліття виявили посилену увагу на два взаємопов'язаних напрями: по-перше, детальне вивчення кінетики фізико-хімічних перетворень у зерні рису під час нагрівання, і, по-друге, оптимізація енергетичних витрат процесів при збереженні або покращенні органолептичних й поживних властивостей кінцевого продукту. Це обумовлено як ресурсними та екологічними викликами (підвищення цін на енергоносії, необхідність зниження викидів парникових газів), так і прагненням до підвищення якості харчових продуктів: збереження вітамінів, поліненасичених жирних кислот і термочутливих ароматичних сполук.

Термічна обробка рису застосовується у різноманітних технологічних режимах: традиційне кип'ятіння у надлишку води, тушкування, парова обробка, інноваційні підходи, такі як приготування у вакуумі або під тиском, мікрохвильова термообробка, а також комбіновані методи (мікрохвилі + пара, інфрачервоне + конвекція). Кожен із зазначених методів має свої особливості теплопередачі та кінетики процесів усередині зерна. Так, при варінні у воді домінуючими є конвективні та кондуктивні механізми передачі тепла через рідину та оболонку зерна, при паровій обробці – паропроникність і конденсація на поверхні, у мікрохвильовому режимі – об'ємний діелектричний нагрів полярних молекул води всередині зерна, що призводить до іншого розподілу температур та швидкості желатинізації.

Кінетика желатинізації крохмалю та гідратації є центральним науковим питанням для приготування вареного рису. Желатинізація – процес руйнування кристалічних зон амілози та амілопектину під впливом води і температури, що супроводжується набуханням гранул крохмалю та зміною в'язкості середовища. Кінетичні параметри цього процесу (швидкість, порядок реакції, енергія активації) залежать від сорту рису, ступеня полірування, попередньої термічної обробки, вмісту вологи, розміру і морфології зерна, а також від конкретного теплового режиму. Різні способи нагріву призводять до різних профілів температури і вологи всередині зерна, що змінює динаміку желатинізації та кінцеву текстуру. Тому для наукового та практичного управління якістю вареного рису необхідно не лише описати кінетику окремих перетворень, а й побудувати інтегровані моделі тепломасопереносу та хіміко-фізичних трансформацій.

Енергетичні аспекти приготування вареного рису охоплюють питому витрату енергії на одиницю про-

дукції, ефективність перетворення спожитої енергії у корисну теплоту, втрати в навколишнє середовище та можливості рекуперації. Традиційне кип'ятіння характеризується суттєвими тепловими втратами (відвід пари, підігрів надлишку води, тепловіддача від стінок посуду), а також низьким рівнем енергоефективності при невеликих партіях. Поява методів, що використовують вакуум, тонкі шарові апарати, індукційне та мікрохвильове нагрівання, дозволяє зменшити теплові втрати і створити більш сприятливі умови для швидкої та рівномірної желатинізації, тим самим знижуючи питомі енерговитрати. Оцінка енергетики методів приготування потребує комплексного підходу, що включає вимірювання споживаної електричної і теплової енергії, аналіз кінцевої температури і вмісту вологи продукту, а також врахування технологічних факторів, таких як час обробки, об'єм партії та продуктивність установки.

Науковий інтерес також викликає питання збереження харчової цінності та мікробіологічної безпеки при різних режимах термообробки. Вміст вітаміну В1, вітаміну РР, деяких амінокислот та мінерних сполук чутливий до температури і тривалості нагріву. Механізми деградації цих компонентів мають свою кінетику, часто описувану першими або другими порядками реакції з власною енергією активації. Оптимізація режимів приготування повинна балансувати між досягненням потрібної текстури та збереженням корисних речовин. Тут важливими чинниками виступають не лише температура і тривалість обробки, але й характер нагріву (поверхневий або об'ємний), а також швидкість масообміну з навколишнім середовищем, яка визначає, наскільки швидко внутрішня вологість досягає умов, необхідних для завершення желатинізації без надлишкового перегріву.

Крім фундаментальної наукової проблематики, існує явна прикладна потреба у стандартизованих підходах до оцінки та порівняння методів приготування вареного рису. Для практичного впровадження інноваційних методів у промислове та побутове виробництво важливими є розробка критеріїв якості (текстура: твердість і клейкість зерен, розпадність, візуальні показники), показників енергетичної ефективності (кДж/кг готового продукту), екологічності (CO_2 -еквівалент на одиницю продукції) та економічної доцільності (капітальні та експлуатаційні витрати, термін окупності).

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Наразі в літературі є багато експериментальних даних щодо окремих методів приготування, проте відсутня узагальнена, системна оцінка кінетичних та енергетичних характеристик різних способів з урахуванням гетерогенності сировини та масштабованості процесу.

В дослідженні [1] ставили за мету дослідити комбінований вплив різних методів сушіння а також попередньої ферментативної обробки на текстурні характеристики, фізичні властивості, кінетику регідратації та засвоюваність вареного рису. Використовували сушіння в камерній конвективній сушарці та сублімаційній. Як модельний продукт використовували гібридний сорт рису Sembada 188. Зразки сублімованого вареного рису демонстрували нижчу об'ємну щільність (0,24...0,28 г/мл) та вищу пористість (58,6...62,9%) порівняно зі зразками вареного рису в камерній конвективній сушарці (об'ємна щільність: 0,47...0,53 г/мл, пористість: 52,3...60,4%). Попередня ферментативна обробка ще більше знизила об'ємну щільність та збільшила пористість. Зразки, оброблені амілоглюкозидазою, демонстрували значно вищі коефіцієнти регідратації ($p < 0,05$), ніж інші зразки, оброблені ферментами, незалежно від техніки сушіння. Зразки сублімованого рису швидкого приготування, обробленого β -амілазою, показали найвищу швидкість перетравлення, ймовірно, через збільшення площі поверхні. Поєднання сублімаційного сушіння та ферментативної обробки амілоглюкозидазою дало найперспективніші результати, отримуючи рис швидкого приготування з чудовими властивостями регідратації та текстури. В дослідженні більшу увагу приділено визначенню якісних характеристик продукту. Кінетичні характеристики процесу сушіння не визначались.

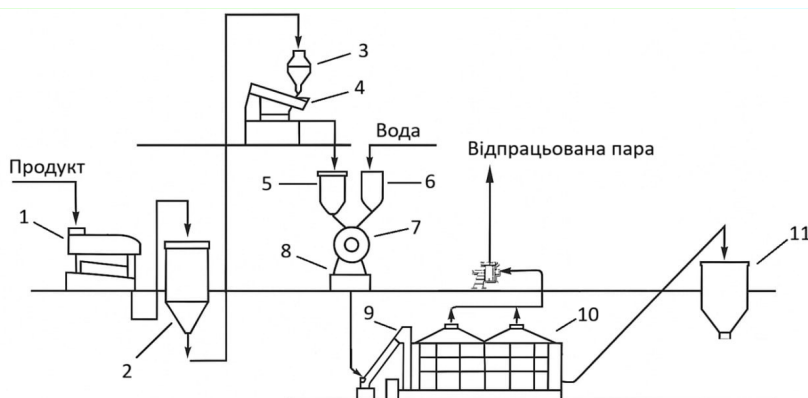
В дослідженні [2] проаналізовано зовнішній вигляд, якість обробки, фізико-хімічні властивості, кулінарні та споживчі якості, а також динаміку характеристик вологості зерна рису та їх співвідношення за умов постійних температур сушіння 40, 50 та 60 °С. Результати показали, що зі збільшенням температури сушіння вміст вільної води в рисі зменшувався, а якість обробки, споживання та приготування погіршувалася. Однак реакція зміни якості рису на температуру сушіння була неоднаковою для різних сортів. Ці відмінності були головним чином зумовлені співвідношенням довжини до ширини, початковим вмістом вільної води та вмістом амілози. У процесі високотемпературного сушіння сорти рису з нижчим співвідношенням довжини до ширини та вмістом амілози, вищим початковим вмістом вільної води демонстрували вищі показники розтріскування зерен та більше зниження харчових якостей. В дослідженні не ставили завдання вивчення енергетичних характеристик процесу.

Одним із способів приготування рису швидкого приготування є варіння, заморожування та сушіння [3], що призводить до утворення пористої структури, яка забезпечує легку регідратацію. Дослідження мало на меті розробити альтернативний метод приготування рису швидкого приготування з використанням комбінації методу сушіння з псевдозрідженим шаром та додавання гліцерину. Зразки були оцінені, включаючи фізичні характеристики, сприйняття споживачами та інформація про харчову цінність вибраного продукту. Рис полірували протягом 30, 45 та 60 секунд, і фіксували ступінь його білизни. Згодом насіння промивали, попередньо варили з додаванням гліцерину (0, 2 та 4%), обробляли парою, заморожували та сушили. Варений рис заморожували в морозильній камері протягом 24 годин при температурі -20 °С та сушили в сушарці з псевдозрідженим шаром до досягнення постійної ваги. Додавання гліцерину не вплинуло на якісні харак-

теристики продукту. Обраний спосіб обробки продемонстрував такі фізичні характеристики: час регідратації (7,5 хв), об'ємна щільність ($0,41 \pm 0,03$ г/мл), водопоглинання ($41,92 \pm 0,50\%$), коефіцієнт регідратації ($3,58 \pm 0,02$) та коефіцієнт розширення об'єму ($223,72 \pm 12,94$), що свідчить про відповідність критеріям швидкого приготування. Харчова цінність на порцію 60 г була наступною: загальна енергетична цінність (240 ккал), білок 3 г (6% від рекомендованої добової норми споживання), загальний вміст жиру 0 г та вуглеводи 56 г.

Для виробництва швидкокорозчинного пророщеного рису VD20 було проведено дослідження кінетики дегідратації [4], термічного розкладу поліфенолів та регідратації швидкокорозчинного продукту. У цьому дослідженні застосовувалися різні температури, включаючи 50°C , 55°C , 60°C та 65°C . Для опису цих змін було розроблено різні моделі. Модель Пейджа найкраще відповідає властивостям дегідратації зразка, з коефіцієнтом дифузії води (D_{ef}) від $7 \cdot 10^{-12}$ до $1,19 \cdot 10^{-11}$ м²/с та енергією активації $31,70$ кДж/моль. Модель нульового порядку описувала зміну поліфенолів під час процесу сушіння. Значення періоду напіврозпаду коливалися від 3,737 год до 5,723 год. Також була використана модель штучної нейронної мережі. Це інтелектуальна модель, створена на основі штучної нейронної мережі. Він працював краще та швидше, ніж попередні моделі, такі як модель Пейджа для поведінки дегідратації та модель нульового порядку для властивості дегідратації. Коефіцієнт регідратації швидкопророщеного рису також добре узгоджувався з експоненціальною моделлю. Ці отримані дані можуть сприяти подальшій оптимізації та виробництву у більших масштабах, що дозволить фермерам виробляти більше продукції з цього рису.

До кафедри процесів, апаратів та енергетичного менеджменту ОНТУ звернувся ПАТ «Енні Фудз», яке планує виробляти рисову кашу швидкого приготування за наступною технологічною схемою (рис. 1).



1 – зерновий сепаратор, 2 – бункер, 3 – автоваги, 4 – зерномийна машина, 5 – бункер-мірник, 6 – збірник-мірник, 7 – варильний апарат, 8 – приймач для круп, 9 – розподілювач, 10 – стрічкова сушарка, 11 – бункер

Рис. 1 – Технологічна схема виробництва каш швидкого приготування

Спочатку крупу очищують від сторонніх домішок на зерновому сепараторі 1. Очищена сировина потрапляє у бункер 2, звідки за потреби транспортується на авто ваги 3. Після зважування крупу направляють у зерномийну машину 4 та збирають у бункер-мірник 5. Після цієї підготовки сировина потрапляє до двох ключових вузлів лінії – до варильного апарату 7, а потім до стрічкової сушарки 10.

Працівники підприємства ПАТ «Енні Фудз» самостійно провели два тестових цикли приготування такої продукції, але невдало через відсутність оптимальних режимів варіння та сушіння рису. Це робилось на досить великих партіях сировини, що, звісно, не є економічно доцільним. Необхідно розробити режими термообробки саме у лабораторних умовах, що забезпечать якість продукту та його швидке відновлення.

Виходячи з розглянутих публікацій та вимог з боку виробників – проблема: відсутність оптимальних режимів варіння та сушіння рису для виробництва каш швидкого приготування, високі енерговитрати при сушінні.

Пропонується наступна гіпотеза: використання НВЧ способу підведення енергії призведе до зниження енерговитрат за рахунок адресної доставки енергії до води, що міститься у продукті

Використання НВЧ обробки та НВЧ обробки у вакуумі призведе до збільшення пор зерна, що, в свою чергу, впливатиме на здатність до відновлення.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження: дослідити процес сушіння вареного рису, визначити режими термообробки, що забезпечать якість продукту та його швидке відновлення

Завдання:

- дослідити кінетику сушіння рису;
- оцінити та порівняти енергетичні витрати процесів;

Матеріали та методи дослідження. Рис довго зернистий (SunPanda, Таїланд) вологістю 7 % попередньо замочували у воді (гідромодуль 1:2) на протязі 15 хв. Процес пропарювання відбувався в автоклаві (M0-ST-75-VU, Україна) при тиску $0,15$ МПа. Саме такий тиск утворюється у варильному апараті на виробницт-

ві. Обробку парою проводили на протязі 25 хв.

Для другої серії експериментів рис варили (гідромодуль 1:2,15) на протязі 20 хв.

Для визначення початкової вологості рис попередньо дробили і пропускали через сито діаметром 1мм. Вологість початкового продукту визначалась методом висушування постійної маси при температурі 120°C. У попередньо висушений бюкс з відомою масою розміщували 5 г продукту. Час висушування становив 45 хвилин. Після цього бюкс розташовувався в ексікаторі для охолодження на 30 хвилин, після чого проводилося зважування на аналітичних вагах Radwag AS 220/С з точністю ± 0.0004 г.

Вологість початкової сировини розраховувався за формулою

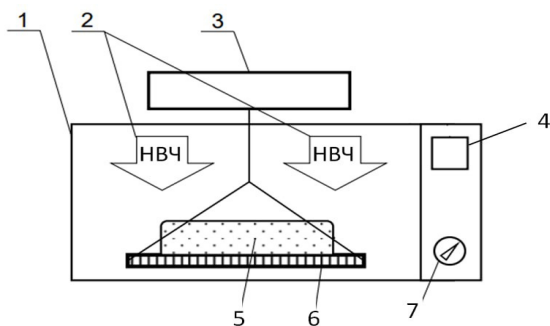
$$w = \left(1 - \frac{m_c}{m_n} \right) \cdot 100\% \tag{1}$$

де, m_c - маса сухого продукту, кг;
 m_n - маса початкової сировини, кг.

Для вирішення завдання експериментального моделювання сушіння сировини мікрохвильовим електромагнітним полем, на базі мікрохвильової камери, зібраний експериментальний стенд, що включає: саму камеру з вбудованою системою витяжної вентиляції та випромінювачем мікрохвильової енергії, електронні ваги (ТВЕ-2,1-0,01), підвіснукасету для розміщення шару сировини, що нагрівається, безконтактний вимірювач температури (Venetech GM320), енергомір (Feron ТМ-55). Схему дослідницького стенду показано на рис. 2.

Відповідно до плану, експеримент проходив у наступному порядку. Шар зерен рису заданої висоти, рівномірно розподілявся по касеті. Касета виконана з радіопрозорого пластику підвішена до вимірювальної пластини лабораторних ваг, що безперервно фіксують вагу зразка. Встановлювалися параметри камери (потужність магнетрону, тривалість включення) і запускався процес, у ході якого безперервно фіксувалися: вага зразка, температура зразка та електрична потужність – періодичним записом показань вимірювальних приладів.

Потужність випромінювання встановлювалася штатними засобами пульта управління мікрохвильової камери нагріву, який дозволяє встановити потужність випромінювання у відсотках щодо максимальної потужності випромінювача. Для проведення серії експериментів були обрані значення 70 % потужності, що відповідає 560 Вт мікрохвильового випромінювання генератора



1 – сушильна камера; 2 – генератори НВЧ поля; 3 – електронні ваги; 4 – таймер; 5 – сировина; 6 – касета; 7 – регулятор потужності НВЧ генераторів

Рис. 2 – Схема стенду для дослідження сушіння сировини

Тривалість експерименту обмежувалася моментом досягнення зразком рівноважної вологості 14%. При досягненні вологості експеримент завершувався, дані вимірювань вносилися до таблиці результатів подальшої обробки.

Таблиця 1

Умови експериментальних досліджень

Метод обробки	Метод сушіння	Початкова Вологість, %	Кінцева вологість, %	Початкова маса продукту, кг
Варіння	НВЧ	68,9	14	0,084
	НВЧ вакуум			
	ГЧ			
Пропарювання	НВЧ	38	14	0,084
	НВЧ вакуум			
	ГЧ			

Схема сушарки з ГЧ випромінювачами аналогічна сушарці з НВЧ. Відмінності – касету виконано зі сталі. Потужність ГЧ випромінювача складала 650 Вт.

Схема сушарки з використанням вакууму аналогічна сушарці з НВЧ. Відмінності – всередині сушильної камери розташовано радіопрозору ємність з продуктом, до якої під'єднано вакуум систему. Тиск в ємності підтримували на рівні $65 \cdot 10^{-5}$ МПа.

Результати досліджень процесу сушіння вареного рису

Результати досліджень кінетики процесу. За отриманими в результаті серії даними, визначено залежність зміни вмісту вологи шару рису, під впливом НВЧ, ІЧ випромінювання та НВЧ обробки у вакуумі. Дані про вміст вологи шару реєструвалися за допомогою електронних ваг як різницю між початковою вагою зразка (навішування) з відомою початковою вологістю і його вагою в контрольних точках в процесі сушіння.

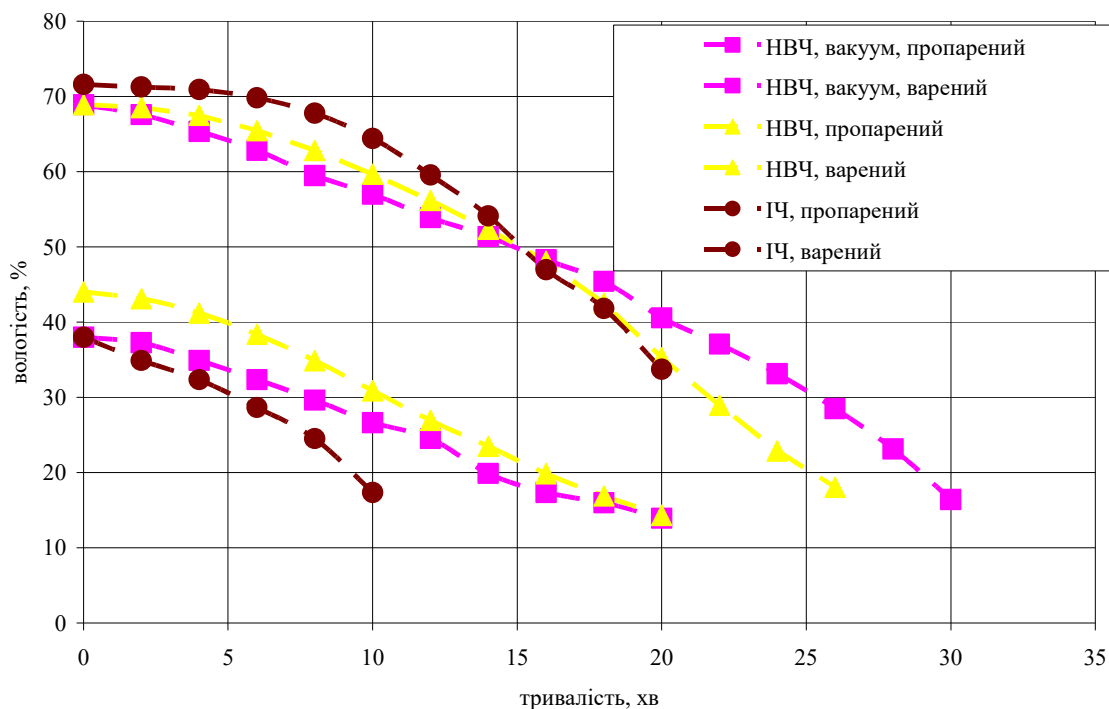


Рис. 3 – Залежність вологості шару рису від способів сушіння та попередньої термообробки

За отриманими даними побудовані графіки зміни вологості шару сировини в процесі сушіння різними способами та для різної попередньої обробки. Графіки залежностей наведено рис. 3. Криві, що відповідають вареному рису починаються із значень більшої вологості, тому розміщені вище, криві пропареного рису відповідно нижче.

Аналізуючи отримані залежності можна визначити, що на кривій сушіння присутня початкова ділянка, що відповідає прогріву шару сировини, величина якого змінюється від 0,5 до 5 хв для вареного рису і до 2 хв для пропареного.

Після ділянки прогріву вологість шару змінюється практично лінійно. До другого етапу сушіння, коли швидкість сушіння падає, а швидкість зменшується внаслідок ущільнення поверхневого шару частинок (зерен), процес не доходить. Отримана залежність побічно підтверджує наявність односпрямованих температурного та вологого градієнтів у зернівках, що не дозволяють ущільнитися поверхні зерен (часток) внаслідок висихання.

Для ІЧ способу швидкість сушіння постійно зростає, про що говорить не характерний вид кривих сушіння.

Оцінка енергетичних витрат процесу. Питомі енерговитрати $E_{\text{пит}}$, МДж/(кг вид. вол.) визначалися як відношення загальної витраченої енергії до кількості віддаленої вологи. Вплив на величину енерговитрат створюють наступні фактори:

1. Властивості продукту: вологість, діелектричні властивості (для НВЧ), оптичні/поглинальні характеристики (для ІЧ), теплопровідність.
2. Товщина шару та геометрія: тонкий шар вигідніший для ІЧ; НВЧ дає перевагу в об'ємі, але потребує оптимізації розподілу поля.
3. Режим роботи: імпульсне дія НВЧ іноді ефективніша, знижує перегрів.
4. Ефективність обладнання: ККД магнетрону, відбиття в камері, теплоізоляція, коефіцієнт корисного завантаження сушарки.
5. Побічні споживачі енергії: вакуум-насос, вентилятори, насоси, конденсатори.
6. Масштаб: на лабораторних установках втрати вище у перерахунку на 1 кг продукції; при індустріаль-

ному масштабі економія вища.

Отримані енерговитрати в залежності від способу сушіння представлені на рис. 4.

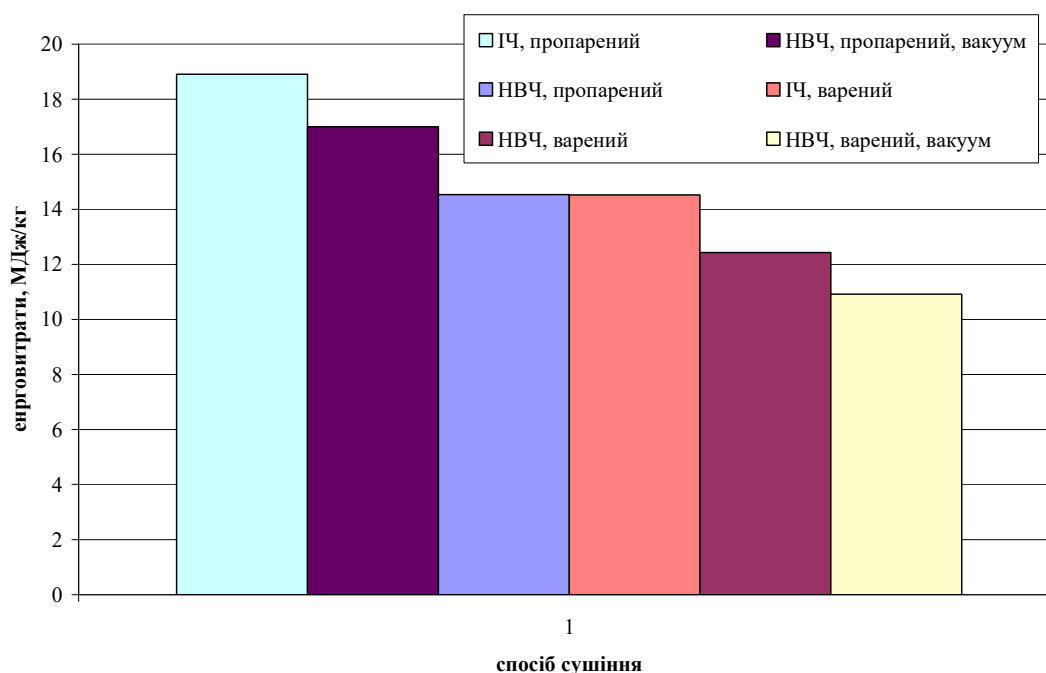


Рис. 4 – Енерговитрати в залежності від термообробки та способу сушіння

Видно, що енерговитрати на процес поступово зменшуються в залежності від термообробки та способу сушіння.

Обговорення результатів дослідження процесу. Результати роботи можуть мати прикладне значення для харчової індустрії (виробники готових страв, консервації), наукових установ, що займаються фізикою крохмалю і технологією зернових продуктів, а також для розробників побутових пристроїв для приготування рису, орієнтованих на енергоефективність та збереження харчової цінності. Новизна полягає у впровадженні інтеграційного підходу, який об'єднує кінетичний аналіз із енергетичною оцінкою технологічних процесів приготування вареного рису. Такий підхід дозволить не лише зрозуміти фундаментальні закономірності, але й надати практичні інструменти для оптимізації режимів.

Питомі витрати вийшли досить високими. Скоріше за все це пов'язано із тим, що в дослідженні використане весь корисний об'єм сушарок. Наважка має бути більшою. Виходячи з рівняння теплового балансу, менше 10% енергії йде на корисну роботу, а все інше потрапляє у навколишнє середовище. напрям наступних досліджень – збільшення маси продукту в касеті, що призведе до більш ефективного використання сушарок та знизить питомі енерговитрати.

Подальшим напрямком роботи також є експерименти з визначення коефіцієнтів регідрації та інших якісних показників продукту.

Висновки

1. Проведено експерименти з визначення кінетику сушіння рису в залежності від способів сушіння та способів термообробки. Найбільша швидкість процесу спостерігається при ІЧ сушінні.
2. Визначено енергетичні витрати процесу. Найнижчі показники відповідають сушінню вареного рису в умовах вакууму та НВЧ поля.

References

1. Yussof, N. Y. S. M., Abu Bakar, N. W., Hong, S.-P., & Basri, A. M. (2025). Combined enzyme-pretreatments and drying techniques on rehydration kinetics, digestibility, and physicochemical properties of instant rice. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19(9), 6584–6600. <https://doi.org/10.1007/s11694-025-03426-z>
2. Fan, F., Zheng, X., Dong, H., Qin, Y., Shao, Y., & Zhu, D. (2025). Analysis of grain moisture distribution and quality response of different types of rice varieties after drying. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 39(8), 1709–1720. <https://doi.org/10.11869/j.issn.1000-8551.2025.08.1709>
3. Purwaningrum, B. A., Taqi, F. M., Muhandri, T., & Saraswati, S. (2025). Development of instant sorghum rice using fluidized bed dryer technology and glycerol addition. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 36(1), 84–94. <https://doi.org/10.6066/jtip.2025.36.1.84>
4. Loan, L. T. K., Tat, T. Q., Minh, P. D. T., Thao, V. T. T., Hoang, P. T. M., Nhi, T. T. Y., Giang, B. L., Phat, D. T., Mansamut, C., & Tai, N. V. (2025). Modeling of dehydration, polyphenol thermal degradation, and

rehydration of instant germinated VD20 rice: Mathematical and artificial intelligence model. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 24(1), 1–18. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim24400>

KINETICS AND ENERGETICS OF DRYING METHODS OF COOKED RICE

Terziev S.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bezbakh I.V., Doctor of Technical Sciences Associate Professor, Taranenko Y.Yu., postgraduate student, Bezbakh S.V., postgraduate student, Kazani V.Z., postgraduate student
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. The study presents experimental research on the kinetics of moisture removal and the energy efficiency of various methods for drying cooked rice. Three types of thermal treatment were investigated: microwave (MW), infrared (IR), and microwave drying under vacuum conditions. The influence of preliminary technological operations—boiling and steaming—on the drying rate, process duration, and specific energy consumption was analyzed. It was found that the use of infrared radiation ensures the highest moisture evaporation rate due to deep heating of the grain, while vacuum microwave drying provides the lowest specific energy consumption as a result of reduced boiling temperature and efficient utilization of electromagnetic energy. Comparative analysis demonstrated that the combined application of IR and MW heating allows optimization of the dehydration process, reduces drying time, and simultaneously preserves the structural integrity and color of the product. Based on the obtained results, recommendations were developed for optimizing laboratory regimes of rice thermal treatment that ensure uniform temperature distribution within the material layer, prevent overheating, and contribute to reducing energy losses, and can also be applied for planning industrial cereal drying technologies with improved energy efficiency. The findings may be used in the development of energy-saving technologies for drying cereal products in the food industry and in the optimization of storage and processing operations at both laboratory and industrial scales.

Keywords: rice, drying, microwave energy, infrared radiation, energy efficiency, kinetics.

Список використаної літератури

1. Yussof N. Y. S. M., Abu Bakar N. W., Hong S.-P., Basri A. M. Combined enzyme-pretreatments and drying techniques on rehydration kinetics, digestibility and physicochemical properties of instant rice. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2025. Vol. 19, No. 9. P. 6584–6600. DOI: [10.1007/s11694-025-03426-z](https://doi.org/10.1007/s11694-025-03426-z).
2. Fan F., Zheng X., Dong H., Qin Y., Shao Y., Zhu D. Analysis of grain moisture distribution and quality response of different types of rice varieties after drying. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*. 2025. Vol. 39, No. 8. P. 1709–1720. DOI: [10.11869/j.issn.1000-8551.2025.08.1709](https://doi.org/10.11869/j.issn.1000-8551.2025.08.1709).
3. Purwaningrum B. A., Taqi F. M., Muhandri T., Saraswati S. Development of instant sorghum rice using fluidized bed dryer technology and glycerol addition. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*. 2025. Vol. 36, No. 1. P. 84–94. DOI: [10.6066/jtip.2025.36.1.84](https://doi.org/10.6066/jtip.2025.36.1.84).
4. Loan L. T. K., Tat T. Q., Minh P. D. T., Thao V. T. T., Hoang P. T. M., Nhi T. T. Y., Giang B. L., Phat D. T., Mansamut C., Tai N. V. Modeling of dehydration, polyphenol thermal degradation, and rehydration of instant germinated VD20 rice: Mathematical and artificial intelligence model. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2025. Vol. 24, No. 1. P. 1–18. DOI: [10.24275/rmiq/Alim24400](https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim24400).

Отримано в редакцію 06.07.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 06.07.2025

Approved 02.09.2025