

ББК 36.87

Піддубний В.А., кандидат технічних наук

*Національний університет харчових технологій*

## **ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ НА СУШАРКАХ СОЛОДУ**

Солод, який одержують після пророщування, підлягає сушінню, відокремленню ростків і витримці в часі. Режимі термічної обробки під час сушіння вибираються певним чином з метою збереження ферментів солоду.

Відомо, що до числа факторів, які зумовлюють баланси теплових і матеріальних ресурсів та необхідний екологічний рівень, є технологічне і технічне забезпечення, вид первинних енергоносіїв, способи підготовки сушильних агентів та кондиціонування повітря, рівень використання вторинних енергетичних ресурсів, ступінь автоматизації технологічних процесів.

В роботі [1] вказується на те, що рециркуляція димових газів в сушарках зменшує витрати первинних енергоресурсів на 14 %, а витрати теплоти на сушарках або солодових заводах становлять 85-90 % від загальних витрат її на виробництво солоду. В сушарках на 100 кг сухого солоду одержують біля 80 кг переведеної в стан пари вологи, а на одержання 1 т солоду за умови ощадливого енергокористування витрачають біля 4 млн. кДж.

Втрати теплової енергії мають місце в вихідних матеріальних потоках димових газів, сушильного агента, солоду та в радіаційному або конвективному розсіюванні теплоти на спорудах та обладнанні.

Що стосується теплових втрат з вихідними матеріальними потоками сушарок, то в багатьох випадках здійснюють рекуперацію вторинних теплових ресурсів з димових газів і сушильного агента. Яких-небудь вказівок на спроби утилізувати теплоту солоду після ростковідбивних машин автор не знайшов і пояснити це можна відносно коротким періодом цієї технологічної операції і відносно складністю технічного виконання такого процесу, хоча не варто стверджувати його безперспективність.

Втрати теплоти з сушильним агентом в солодосушарках становлять до 30 і навіть до 50 % загальних втрат на сушіння солоду. З метою зменшення таких втрат використовують скляні теплообмінники, в яких теплота передається вхідному потоку повітря, що поступає потім в теплогенератор або калорифер. В теплообміннику накопичується конденсат водяної пари, який видаляється безперервно або циклічно.

Є дані, що скляні теплообмінники скорочують витрати палива на 30-35 %, а термін їх окупності складає біля 2 років.

Відомо, що за інших рівних умов їх мінімізація досягається в сушарці безперервної дії. Певний вплив на кінцевий результат має спосіб сушіння. В літературі є вказівки на те, що за умови імпульсного подавання сушильного агента вдається зекономити до 40 % енерговитрат на етапі сушіння і термічної

обробки порівняно зі звичайним режимом. Таке твердження мабуть може бути справедливим в екстремальних умовах, проте за умови вірно вибраних витрат сушильного агента на процес такий рівень економії енерговитрат здається сумнівним. Імпульсне сушіння солоду інтенсифікує технологічний процес за рахунок того, що в проміжках часу зупинки в подаванні сушильного агента температурний і концентраційний градієнти співпадають. Однак випаровування однієї і тієї ж кількості вологи потребує однакових енергетичних витрат, тому загальна кількість підведеної теплової енергії залишається однаковою. Проте економія можлива за рахунок скорочення загального часу сушіння і витрат в навколишнє середовище.

Можливо погодитися з поширеною думкою відносно того, що критерієм оптимізації сушіння солоду мають виступати мінімальні питомі енерговитрати за умови високої якості цільового продукту

Контрольним параметром оптимізації за таким критерієм має бути відносна вологість відпрацьованого сушильного агента. Останній показник має корелювати з вологістю солоду. Таким чином, якщо втримувати показник відносної вологості в межах розрахункової номінальної, то це означає мінімізацію теплових витрат. Зниження відносної вологості за номінальну при заданій температурі означає наявність теплових витрат.

Певна їх компенсація буде за умови рекуператора теплової енергії, а при відсутності останнього витрати стають незворотніми.

До числа поширених на Україні відносяться двоярусні сушарки, у яких на верхній решітці процес характеризується швидким видаленням вологи від 43-45 % до 10-12 за відносно низьких температур. На нижній решітці видалення вологи здійснюється значно повільніше в діапазоні від 8-10 до 3-3,5 %.

Інтереси технології потребують постійного зростання температури сушильного агента від початку до завершення процесу.

Для оцінки стану солоду використовують такий непрямий показник як різниця температур сушильного агента під решіткою і над шаром солоду. Два інших важливих параметри сушильного агента, такі як витрати за одиницю часу і відносна вологість, практично не контролюються.

За відомих переваг компоновки двоярусних сушарок мають місце і недоліки. Відомо, що витрати сушильного агента через нижню і верхню решітки практично однакові, хоча масообмінні процеси на них суттєво відрізняються через різні форми зв'язку вологи і супроводжується різними кількостями видаленої вологи.

Якоюсь мірою ця невідповідність компенсується різницею температур сушильного агента на нижній і верхній решітках, але ця компенсація явно недостатня. Різниця температур повітря до і після шару буде відносно малою. Тому для одержання різних режимів сушіння на нижній і верхній решітках виникає необхідність подавання свіжого повітря під верхню решітку, де воно змішується в певній пропорції з сушильним агентом і утворює суміш необхідних параметрів.

При цьому вся теплота, яка необхідна для сушіння солоду і компенсації втрат теплоти сушаркою, передається повітрю, що потрапляє під нижню решітку. Надалі цю частину будемо називати *первинним* повітрям.

Робота сушарки з додаванням *вторинного* повітря тим більш доцільна, що інтереси технології потребують швидкого видалення вологи за значних витрат повітря.

Керуючись відомими положеннями в організації роботи двоярусних сушарок, визначимо перспективи рекуперації теплової енергії і зменшення витрат останньої на процес. Рекуперативними режимами передбачимо утилізацію теплоти газів згорання теплогенератора і відпрацьованого повітря. Розглянемо кілька варіантів.

*Варіант 1.* Стосується сушарки, яка працює в режимі, коли кількість повітря на нижній і верхній решітках однакова (рис. 1). Схемою передбачається двоступінчасте підігрівання повітря, яке подається в теплогенератор. Така система передбачає можливість регулювання повітряних потоків, повне згорання газу і зменшує витрати теплоти на догрівання повітря.

*Варіант 2.* Схema з подаванням вторинного повітря (рис. 2). Тут у теплообміннику 5 продукти згорання підігрівають потік повітря, який потім поділяється на три частини: перша – це вторинне повітря; друга – потік, що поступає на газогенератор 4, третя – потік, що поступає на газогенератор і основний калорифер. Вторинне повітря за необхідності може відбиратися і після теплообмінника 4. Доцільність вибору місця встановлення подільника потоку залежить від вхідних да-

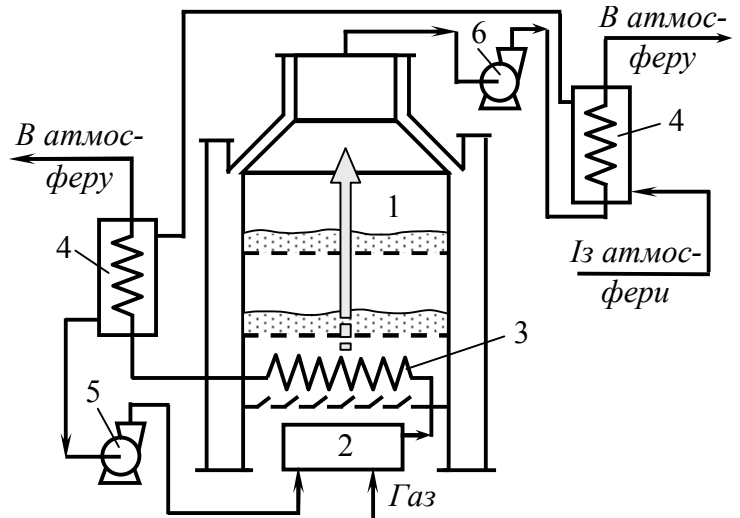


Рис. 1. Схema сушарки без подавання вторинного повітря: 1 – сушарка; 2 – газогенератор; 3 – калорифер; 4 – теплообмінники; 5, 6 – вентилятори

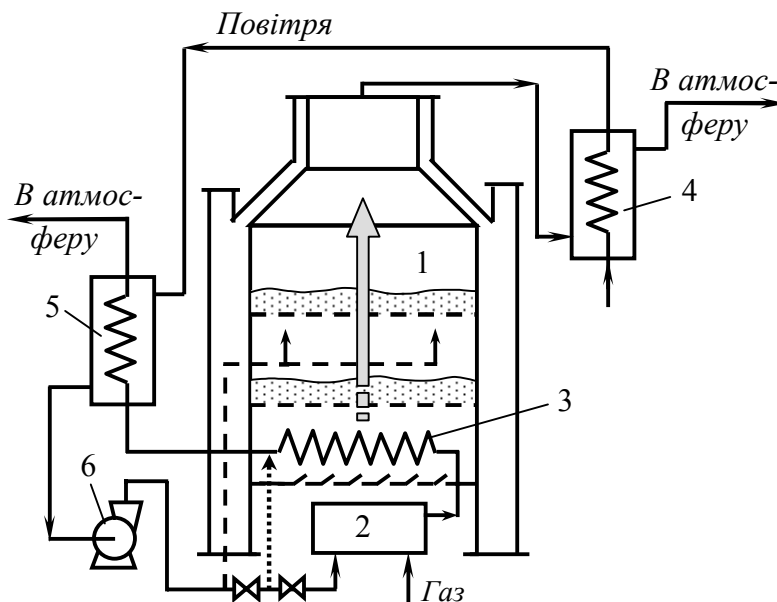


Рис. 2. Схema сушарки з подаванням вторинного повітря: 1 – сушарка; 2 – газогенератор; 3 – калорифер; 4, 5 – теплообмінники; 6 – вентилятор; ..... – первинне повітря; - - - – вторинне повітря

них і характеристики системи.

Аналіз роботи двоярусних сушарок призводить до висновку, що використовувані графіки сушіння і динаміка зміни вологи суперечать можливості оптимізації процесу. Це протиріччя в своїй основі має кардинальну різницю навантажень нижньої і верхньої решіток по волозі і ускладнюється складністю витримки необхідних співвідношень первинного і вторинного повітря. За умовами роботи нижньої решітки може бути можливою часткова рециркуляція повітря, що пройшла через неї. На верхній решітці рециркуляція неможлива.

Заслуговує на увагу об'єднана думка спеціалістів Воронежської академії харчових технологій та Національного університету харчових технологій [1], яка ґрунтується на системному аналізі біотехнологічних процесів, що відбуваються при ворушінні солоду під час сушіння і термічної обробки. Встановлено, що ворушіння солоду в цей період не прискорює сушіння, а навпаки знижує його ефективність.

Фізичну суть такого явища пояснюють тим, що за умови значного шару солоду до першого перемішування утворюється вагома різниця вологості зерна по висоті. Очевидно, що й сушильний агент змінює показник своєї відносної вологості саме по висоті шару. Тому не виключено, що більше висушений солод нижніх шарів, потрапляючи в верхні шари після перемішування, буде в умовах поза межами зрівноваженого стану по вологості, і в результаті буде зволожуватись. По зовнішнім оцінкам в цьому твердженні є логічні ознаки, однак ґрунтовні докази авторами не наводяться. Зрозуміло, що відсутність перемішування в певній мірі спрощує технологію, і приводить до зменшення витрат електроенергії, однак те, що нижні і верхні шари солоду за весь цикл одержать різні впливи сушильного агента сумніву не викликає. Зі збільшенням шару солоду ця різниця впливів зростає. Негативні явища повторного зволоження можливо нівелювати, наприклад, за рахунок активного перемішування, проте все більше поширення знаходить практика сушіння солоду в високому шарі і без перемішування. А за таких умов, як було показано, рекуперація теплоти сушильного агента стає обов'язковою.

Хоча питаннями утилізації теплоти сушильних агентів займаються виробничники і вчені вже біля ста років, вітчизняні підприємства мають обмежений досвід експлуатації рекуператорів. Між тим подальший розвиток виробництва солоду багато в чому залежатиме саме від впровадження енергозберігаючих технологій.

В літературних джерелах [1, 2] вказується на те, що до числа утилізаторів теплоти відносяться: 1) регенератори – обертальні, статичні з насадками, пластинчасті; 2) рекуператори пластинчасті, трубчасті, з проміжним теплоносієм; 3) теплові насоси; 4) багатокамерні (баштові), з проміжним теплоносієм; 5) теплообмінники з тепловими трубами статичні і відцентрові. Створення рекуператорів пов'язано з проблемою підвищення коефіцієнтів теплопередачі, оскільки температурні перепади обмежені. Особливості рекуперації на сушарках солоду складаються з необхідності передачі теплоти від одного відносно великого газового потоку до іншого. В таких умовах важко обійтись без проміжного тепло-

носія. Якщо теплоносії вибрати таким чином, щоб на ділянці відбирання теплоти у відпрацьованого агента він кипів, а на ділянці передачі теплоти свіжому повітрю конденсувався, то фазові переходи проміжного теплоносія дадуть найбільші з можливих коефіцієнтів тепловіддачі [2, 3].

Необхідні значення коефіцієнтів теплопровідності можливо отримати відповідним вибором матеріалу поверхні теплопередавання. Очевидно, що лімітувати процес в таких умовах будуть коефіцієнти тепловіддачі від агента до стінки теплопередавальної поверхні і від неї до свіжого повітря. Відомо, що на цих ділянках інтенсифікувати процес можливо за рахунок швидкості газових потоків, проте останнє пов'язано зі зростанням втрат напору.

Створення такої схеми рекуперації, однак, пов'язується з необхідністю врахування режимів роботи сушарок, бо відомо, що температура сушильного агента на виході змінюється в одному циклі від 20 до 85-100 °С. Змінюється також і температура повітря, що забирається на процес. В таких умовах реалізація системи з фазовими переходами проміжного теплоносія можлива лише за рахунок зміни тиску в його контурі. Схематичне зображення системи наведено на рис. 3 [4].

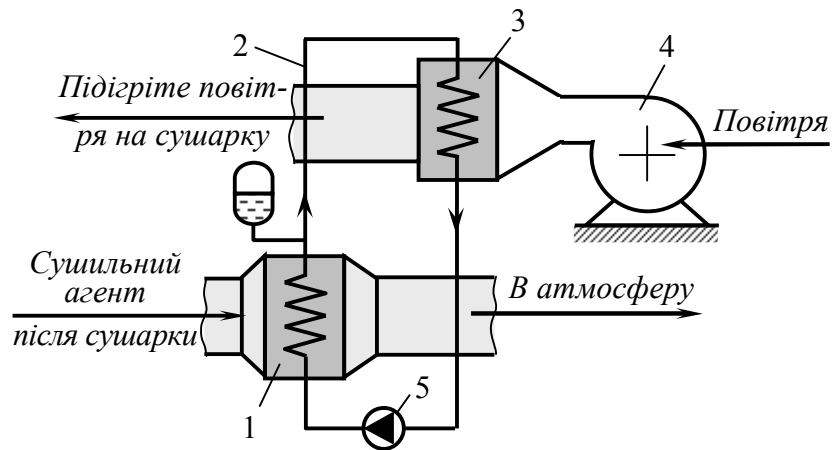


Рис. 3. Схема рекуператора з проміжним теплоносієм: 1 – теплообмінник для відбирання теплоти у відпрацьованого сушильного агента; 2 – циркуляційний контур проміжного теплоносія; 3 – теплообмінник для нагрівання свіжого повітря; 4 – вентилятор; 5 – насос

Для системи з фазовими переходами проміжного теплоносія циркуляційний контур 2 перетворюється власне на теплову трубу з розвиненими зонами випаровування і конденсації, роль яких відіграють теплообмінники 1 і 3 відповідно. За вертикального розташування системи (як на схемі), гравітаційні сили повертатимуть конденсат проміжного теплового агента в випаровувач-теплообмінник 1. За таких умов робота буде можливою і без насоса 5.

Практично у діапазоні температур системи можливе використання води в ролі проміжного теплоносія і тоді використання насоса 5 буде бажаним, оскільки конвективної циркуляції буде недостатньо. Важливо те, що вказана система може бути здійснена на основі складових, які поставлені на серійне виробництво підприємствами України.

В умовах фазових переходів можуть працювати такі теплоносії як аміак, фреони або навіть вода за створення відповідного розрідження в циркуля-

ційному контурі. Перші два з числа названих теплоносіїв використовуються і в теплових насосах, хоча можливий діапазон температурних режимів за їх використання може бути суттєво більшим. Нагадаємо, що тепловий насос складається з тих же основних елементів, що і холодильний пристрій (випаровувач, компресор, конденсатор, дросель). Завдяки останньому одержуємо можливість конденсацію і випаровування здійснювати за різних тисків і температур і це дає змогу відбирати теплоту у більш охолоджених матеріалів і передавати більш нагрітим за рахунок роботи компресора. Холодильний коефіцієнт для різних насосів складає від 3 до 7 одиниць і це означає, що на 1 кВт потужності припадає від 3 до 7 кВт теплових потоків.

Важливою перевагою теплового насоса можна вважати можливість роботи в умовах змінних температур охолоджувального потоку сушильного агента і свіжого повітря. Вибором температурних режимів процес відбирання теплоти у відпрацьованого сушильного агента доцільно спрямовувати в режимі конденсації вологи для підвищення ефективності процесу. Проте слід пам'ятати, що за наявності сірковмістких первинних теплоносіїв і коли продукти згоряння є сушильним агентом, термін роботи теплообмінного апарата різко скорочується.

Та обставина, що в режимі конденсації вологи відпрацьований сушильний агент осушується, дає можливість якусь його долю повертати в режимі рециркуляції в калорифери на вхід до сушарки. Взагалі використання теплових насосів і осушування повітря дають можливість створення замкнених циклів користування повітрям.

В літературних джерелах є вказівки на можливість використання хімічних осушувачів повітря, наприклад літій-хлоридних. Осушене повітря дозволяє майже на третину скоротити процес і повністю перейти на рекупераційне повітря, що мінімізує енергетичні витрати, хоча літєвий осушувач потребує певної кількості теплоти для регенерації робочого середовища.

Теплові насоси для відповідної підготовки повітря (нагрівання і охолодження) на рівні серійних агрегатів освоєні Мелітопольським заводом холодильного машинобудування під назвою теплохолодильна установка. В якості холодильного агента використовується фреон-142, який має більш високу температуру конденсації, ніж фреон-12. За тиску в межах 0,6-1,1 МПа після компресора повітря після конденсатора нагрівається до 40-67° С.

Перспективною є можливість одержання температури сушильного агента 60-80 °С при використанні фреонів, а для вимог одержання більш високих температур потрібно використовувати інші речовини або комбінувати нагрівання повітря в теплових насосах з іншими методами енергопідведення. В практичних умовах робота вказаних систем здійснюється з коефіцієнтом трансформації енергії, який є відношенням енергії, що передається сушильному агенту в конденсаторі до використаної енергії в компресорі, рівним від 4,5 до 5,4 одиниць. За таких співвідношень використання теплових насосів стає економічно доцільним і навіть в умовах сезонних виробництв сільського господарства вони почали знаходити все більш широке використання в країнах Європи та Америки ще у вісімдесяти роки минулого століття.

Поєднання інтересів процесів пророщування солоду і його сушіння досягається саме використанням теплових насосів, оскільки відпрацьоване повітря після сушарки охолоджується у випаровувачі і може бути спрямоване на аерацію в солодоростильні пристрої. Останнє доцільно як в літній, так і в зимовий сезони, оскільки влітку буде отримано охоложене і насичене вологою повітря, а взимку зникає необхідність енергетичних втрат, пов'язаних з нагріванням холодного повітря. Принципова схема такої схеми комплексного використання теплового насоса показана на рис. 4 [4].

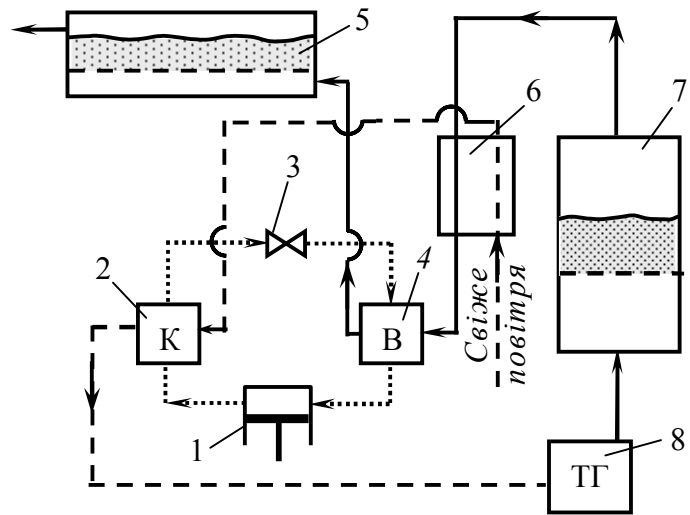


Рис. 4. Схема до комплексного використання теплового насоса у виробництві солоду: 1 – компресор; 2 – конденсатор; 3 – дросель; 4 – випаровувач; 5 – солодоростильний ящик; 6 – теплообмінник; 7 – сушарка; 8 – теплогенератор

**Висновки.** 1. Запропоновано до використання кілька схем рекуперації теплової енергії.

2. Збільшення висоти шару солоду в процесі сушіння потребує використання рекупераційних схем.

3. Вирішення задачі теплообміну між двома повітряними потоками може досягатися використанням схеми з проміжним теплоносієм або в схемах з тепловими насосами.

### Література

1. Домарецький В.А., Прибильський В.А., Михайлов М.Г. Технологія екстрактів, концентратів і напоїв із рослинної сировини. – Вінниця: Нова книга, – 2005. – 408 с.

2. Соколенко А.І., Українець А.І., Піддубний В.А. Транспортно-технологічні системи пивзаводів. – К.: АртЕк, – 2002. – 304 с.

3. Домарецький В.А. Технологія солоду та пива. – К.: Урожай, – 1999. – 537 с.

4. Деклараційний патент України № 15647. Система рекуперації енергетичних потоків у виробництві солоду. Соколенко А.І., Шевченко О.Ю., Бут С.А., Піддубний В.А. та ін. Опубл. 17.07.06. Бюл. № 7.

5. Деклараційний патент України № 14523. Пристрій для рекуперації теплової енергії в системах теплообміну між двома газовими потоками. Соколенко А.І., Шевченко О.Ю., Резнік В.Г., Піддубний В.А. Опубл. 15.05.06. Бюл. № 5.