

# Технологічні особливості пророщування зерна та кондиціонування аераційного повітря

Соколенко А.І., доктор технічних наук, Максименко І.Ф., Бойко О.О., Білик О.А., кандидат технічних наук

**З**агальна оцінка процесів пророщування зерна складається з трьох етапів, що стосуються морфологічних, біохімічних та хімічних змін.

Морфологічні зміни характеризуються появою корінців і пелюстки. Цей період називають «накльовуванням». Розвиток зародкового паростку не повинен виступати за верхівку зернівки. Довжина паростку і корінців пропорційна втратам сухих речовин, що обмежується мінімізацією часу пророщування і температури процесу.

Проростання зерна супроводжується цитологічними змінами його складових частин. Під дією ферментів відбувається

гідроліз клітин ендосперму, стінки клітин алейронового шару та кож частково гідролізуються.

Біохімічні та хімічні зміни в зерні при пророщуванні добре вивчені і стосуються ферментативних перетворень [1], оптимізація яких пов'язана з такими факторами, як температура в шарі солоду, вологість солоду та інтенсивність аерації.

Основні критерії оптимізації солододорощення – це найбільш висока ферментативна активність при мінімальних втратах сухих речовин і низькій собівартості.

Підвищення температури солододорощення супроводжується втратою сухих речовин зерна внаслідок окислювальних процесів

і значного росту вегетативних частин. Збільшення температури на 1°C приводить до збільшення інтенсивності дихання на 20%.

Втрати цукрів і крохмалю при солодоращенні не повинні перевищувати 16% від їхнього вмісту в зерні, що складає 1,2% від усіх зброджуваних речовин зерна.

Оптимальна температура для накопичення гідролітичних ферментів ячмінного солоду – 14-17, просяного – 25-30°C. Для більшості гідролітичних ферментів оптимальною при пророщуванні є вологість 44-48%.

Важлива роль належить інтенсивності аерації солоду, оскільки кисень бере участь у синтезі й активуванні ряду ферментів. Підвищення концентрації CO<sub>2</sub> в повітрі для аерації до 8% інгібує ріст зерна, хоча триває його розчинення. При концентрації CO<sub>2</sub> понад 20% нормальне дихання припиняється і починається автоліз зерна. В зв'язку з цим нами більш детально розглянуто кондиціонування аераційного повітря.

Тонкий шар пророщуваного солоду знаходиться в природно-му контактуванні з повітрям лише на токових солодовнях. У всіх інших випадках солод розташовується на перфорованих ситах у шарі до 1,5 м. Кількість повітря, що подається на аерацію, має забезпечити перебіг всіх життєвих процесів. У рекомендаціях [2] наводяться дані щодо витрат повітря від 300 до 700 м<sup>3</sup> на 1 тону ячменю за 1 год. Не викликає сумніву те, що ці дані є узагальненням значної кількості емпіричних показників, проте, у фізичній суті в них запрограмована помилка. Вона пов'язана з тим, що цією характеристикою рівня аерації ніяк не враховується такий важливий показник, як висота шару зерна, та її співвідношення з двома іншими геометричними габаритами.

Об'єктивним показником рівня аерації шару зерна могла б слугувати наведена швидкість повітря в поперечному перерізі шару. Розрахункова формула у цьому випадку приводиться до вигляду:

$$W_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{п}}}{F} \quad (1)$$

де V<sub>п</sub> – об'ємний потік повітря, м<sup>3</sup>/с;

F – площа поперечного перерізу ящика.

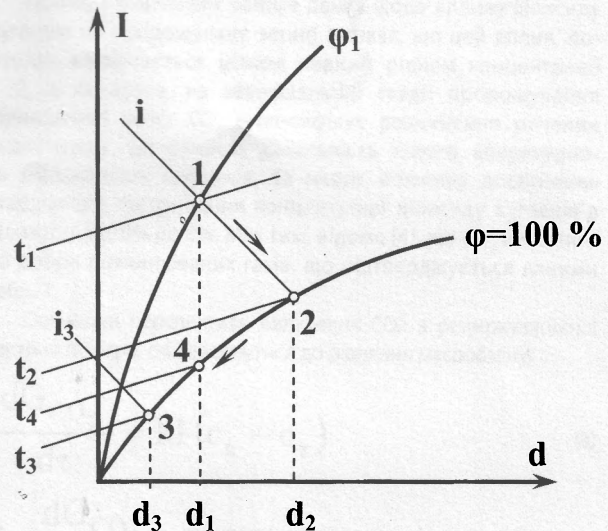
Пропускання повітря через шар солоду супроводжується охолодженням останнього і відведенням діоксиду вуглецю. За даними [2], кількість теплоти, що виділяється в процесі пророщування, складає 850 тис. кДж на кожен тону ячменю за весь цикл. Якщо вважати, що цикл пророщування триває 7 діб (168 год.), то питоме енергетичне навантаження становить:

$$Q = 850000 : 168 = 5060 \text{ кДж/год.} \quad (2)$$

а його потужність:

$$N = \frac{Q}{3600} = \frac{5060}{3600} = 1,4 \text{ кВт.} \quad (3)$$

Організовується тепловідведення за рахунок того, що повітря на аерацію підводиться з температурою, на 2°C ниж-



■ Рис. 1. Схема до визначення параметрів процесу охолодження повітря

чою за номінальну температуру солоду. При цьому рівень тепловідведення визначається не тільки різницею температур на вході повітря в шар зерна і на виході, а і його збільшеним вологовмістом. У зв'язку з необхідністю досягати заданих температур для повітря воно охолоджується або нагрівається.

Зміни термодинамічних параметрів повітря за його нагрівання, охолодження або в режимі аерації відслідковуються на основі діаграми I-d стану повітря. Зволоження повітря до рівня відносної вологості φ=100% є обов'язковою процедурою, оскільки її невиконання матиме наслідком висушування солоду, що неприпустимо за технологічними вимогами.

Зволоження повітря досягається за рахунок дрібнодисперсного розпилювання в ньому води. Витрати останньої оцінюються у 0,5 м<sup>3</sup> на 1 тону ячменю за цикл пророщування. Визначено, що охолодження повітря доцільно здійснювати за рахунок випарників холодильних установок.

Під час пророщування ячмінь активно дихає, витрачаючи на цей процес цінні речовини. Однак у завершальній стадії мають місце активні процеси ферментативного розчинення, які відбуваються незалежно від дихання, хоча при цьому відсутній сенс витрачання значної кількості речовини ендосперму. У зв'язку з цим доцільно здійснювати рециркуляційне повернення повітря з підвищеним вмістом CO<sub>2</sub>, який гальмує дихальні процеси.

Важливою складовою процесів солодоращення є механічне перемішування солоду, мета якого полягає в обмеженні зростання корінців зернівок і вирівнюванні температур [3].

Кондиціонування повітря має суттєві відмінності за термодинамічними параметрами не лише у зв'язку із сезонними коливаннями температури, а навіть з їхніми різними добовими значеннями. Різниця денних і нічних температур повітря у літній сезон може сягати 15-20°C, що приводить до принципових відмінностей у його підготовці.

Зволоження повітря у камерах кондиціонування

■ Таблиця 1. Розчинність газів у воді, м3/м3 за парціального тиску 0,1 МПа

Газ	Температура, °C							
	0	5	10	15	20	25	30	40
Азот	0,0235	0,0209	0,0186	0,0168	0,0154	0,0143	0,0134	0,018
Кисень	0,0489	0,0429	0,0380	0,0341	0,0310	0,0283	0,0261	0,0231
Водень	0,0215	0,0204	0,0195	0,0188	0,0182	0,0175	0,0170	0,0164
CO <sub>2</sub>	1,713	1,424	1,194	1,019	0,878	0,759	0,665	0,530

спроводжується його охолодженням, рівень якого визначається початковою відносною вологістю, але температурний перепад при цьому не перевищує 6°C. Це означає необхідність використання можливостей холодильних установок для більш глибокого охолодження денного повітря до 10-12°C. При цьому необхідно здійснити вибір послідовності з двох вказаних процесів. У зв'язку з цим виконаємо аналіз їхнього перебігу на основі діаграми I-d (рис. 1).

Нехай початковим параметрам температури  $t_1$  та відносною вологістю  $\phi$ , відповідає точка 1 на діаграмі. Ізоентальпійне вологонасичення повітря приводить процес у точку 2, якій відповідає ізотерма  $t_2$ . Якщо задана температура  $t_3$  в процесі ізоентальпійного насичення повітря вологою не досягається, то треба надалі охолоджувати повітря через теплообмінну поверхню (відрізок 2-3 на кривій  $\phi=100\%$ ). В такому процесі змінюється абсолютна вологість від значення  $d_2$  до величини  $d_3$ , а кількість теплоти, яку необхідно відвести, визначається формулою:

$$Q_{2-3} = mc(t_2 - t_3) + mr(d_2 - d_3), \quad (4)$$

де  $m$  – маса повітря;

$c$  – теплоємність повітря;

$r$  – теплота конденсації водяної пари.

Значення величини навантаження на холодильну установку відповідає параметру  $Q_{2-3}$ , тоді як теплове навантаження процесу 1-2 складає:

$$Q_{1-2} = mr(d_2 - d_1) \quad (5)$$

і йому відповідає:

$$i_2 = \frac{r(d_2 - d_1) - ct_1}{c} \quad (6)$$

Охолодженням повітря у процесі 1-4 через поверхню передавання досягаємо вологонасичення у точці 4, і якщо  $t_2 > t_3$ , то подальшому процесу охолодження відповідає ділянка 4-3. У цьому випадку все теплове навантаження з охолодження стосується холодильної установки і:

$$Q_{1-4-3} = i_1 - i_3 \quad (7)$$

Очевидно, що за різних початкових умов  $t_1$  та  $\phi$ , досягаються різні кінцеві результати, оцінка яких визначає доцільність вибору методу охолодження повітря.

Поглиблений аналіз процесів, що відбуваються за кондиціонування повітря, особливе значення має за екстремальних температур зимового та літнього сезонів. При цьому особливої уваги заслуговують режими рециркуляційного використання повітря, яке за своїми температурними показниками і відносною вологістю наближене до номінальних значень. Однак результатом біохімічних процесів є поглинання кисню і виділення  $CO_2$ , що приводить до зміни хімічного складу повітря і обумовлює певним чином рівень рециркуляції.

Проте, з наведених раніше даних щодо впливу діоксиду вуглецю на пророщуване зерно витікає, що цей вплив, по-перше, визначається цілком певним рівнем концентрації  $CO_2$ , а, по-друге, на завершальній стадії пророщування підвищений вміст  $CO_2$  інтенсифікує розчинення речовин ендосперму. Це означає доцільність такого апаратурного оформлення процесів, за якого можливе досягнення стабільного підтримання концентрації діоксиду вуглецю в діапазоні від 0% до 8%. Між тим, відомо [4], що  $CO_2$  належить до добре розчинюваних газів, що підтверджується даними табл. 1.

Оцінюючи перспективи вилучення  $CO_2$  з рециркуляційної частини повітря, слід звернутися до рівняння масообміну:

$$\frac{dG_{CO_2}}{dt} = kF(c_H - c_T), \quad (8)$$

де  $\frac{dG_{CO_2}}{dt}$  – швидкість розчинення діоксиду вуглецю у рідинній фазі;

$k$  – коефіцієнт масопередачі;

$F$  – площа поверхні масопередачі;

$c_H$  – стала насичення рідинної фази діоксидом вуглецю за певних значень парціального тиску  $CO_2$  у газовому середовищі та температури;

$c_T$  – плинна концентрація розчиненого  $CO_2$ .

Стала насичення  $c_H$  визначається у відповідності до закону Генрі:

$$c_H = k_{\Gamma} p \quad (9)$$

де  $k_{\Gamma}$  – константа Генрі, що враховує фізико-хімічні властивості газової та рідинної фаз і температуру середовищ, що взаємодіють;

$p$  – парціальний тиск  $CO_2$  у газовій суміші.

У значному діапазоні парціальних тисків залежності  $c_H = c_H(p)$  мають лінійний характер, що відповідає закону Генрі.

Для певної рідинної фази значення константи Генрі суттєво залежать від температури, зниження якої підвищує розчинність. Принципово це важливо з точки зору інтересів вилучення діоксиду вуглецю з газової фази у камері кондиціонування в процесі зволоження повітря. Важливо, що ці дві операції об'єднують в одному процесі з позитивними наслідками для обох.

Наведені дані дозволяють зробити оцінку про перспективність десорбції діоксиду вуглецю з рециркуляційної частини повітря водою в камері кондиціонування.

### Висновки:

1. Використання рециркуляційних режимів у підготовці повітря обмежується накопиченням у газовій фазі діоксиду вуглецю і зниженням вмісту кисню.

2. Відсутня теорія перебігу масообмінних процесів за аерації зернової маси, визначення термодинамічних параметрів, нерівномірності температурних полів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Циганков П.С., Жолнер І.Д. *Технологія спирту*. – К.: НУХТ, 2003. – 496 с.
2. Кунце В., Мит Г. *Технологія солода і пива: Пер. с нем.* – СПб.: «Изд-во», 2003. – 912 с.
3. Калунянц К.А. *Химия солода и пива*. – М.: «Агропромиздат», 1990. – 176 с.
4. *Справочник химика. Т. 3.* – Л.: «Химия», 1965. – 1005 с.