

УДК 664.726

Груданов В.Я., доктор технических наук, профессор,  
 Поздняков В.М., кандидат технических наук, доцент, Э. И. Пол Дивейни, кандидат технических наук  
 Белорусский государственный аграрный технический университет, г.Минск  
 Белохвостов Г.И., кандидат технических наук, доцент  
 УП «Минскпроект», г. Минск, Республика Беларусь

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖАРКИ СОЛОДА В АППАРАТАХ БАРАБАННОГО ТИПА

Процесс обжарки солода складывается из двух этапов. Первый(этап I) – выдерживание зерен ячменя в течении 30–45 минут и температуре 60–75 °С, при этом происходит окончательное осахаривание солодового зерна. Признаком хорошего осахаривания служит разжиженное состояние эндосперма, который легко выжимается при раздавливании зерна. Во время второго этапа (этап II) температура повышается до 170 °С. Зерно при такой температуре выдерживают до 2,0–2,5 ч в зависимости от требуемых показателей готового солода.

Принимая во внимание конструктивные особенности обжарочного аппарата, можно считать, что в рабочей камере аппарата – обжарочном барабане, имеет место в основном процесс переноса теплоты теплопроводностью, а сам барабан вместе с продуктом представляет собой многослойную цилиндрическую стенку. В этом случае термическое сопротивление многослойной цилиндрической стенки равно сумме сопротивлений отдельных слоев, при этом первый слой – стенка барабана, а следующий слой – обрабатываемый продукт – солод, который условно можно разделить на ряд слоев. На рисунке 1 представлена схема поперечного сечения обжарочного барабана, заполненного частично обрабатываемым продуктом. Здесь же показана схема распределения температуры по радиусу барабана.

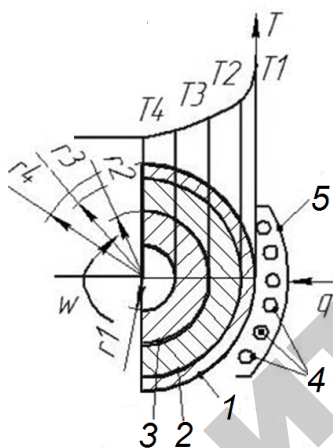


Рисунок 1 – Схема распределения температуры по поперечному сечению обжарочного барабана  
 $\omega$  – направление вращения барабана;  
 $q$  – плотность теплового потока;  
 1 – цилиндрическая стенка обжарочного барабана;  
 2 – первый слой обжариваемого продукта;  
 3 – второй слой обжариваемого продукта;  
 $r_1 \dots r_4$  – радиусы слоев;  $T_1 \dots T_4$  – температуры слоев; 4 – ТЭНы (источник теплоты); 5 – экран отражающий

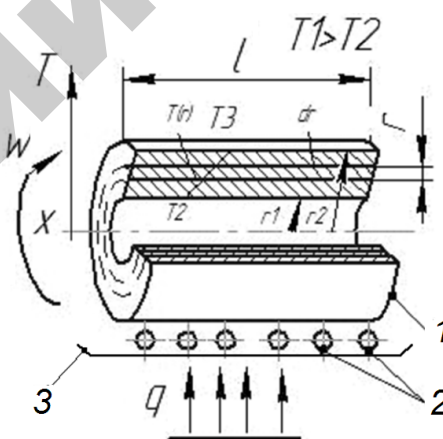


Рисунок 2 – Схема одномерного процесса теплопроводности цилиндрической стенки обжарочного барабана  
 1 – стенка обжарочного барабана; 2 – нагревательные элементы (ТЭНы воздушные); 3 – экранотражающий;  
 $q$  – направление теплового потока;  $T_1$  – температура на наружной поверхности стенки;  $T_2$  – температура на внутренней поверхности стенки;  $r$  – радиус слоя стенки;  $r_1$  – радиус внутренней стенки;  $r_2$  – радиус наружной стенки;  $l$  – длина барабана;  $\omega$  – направление вращения барабана

Распределение температуры по толщине цилиндрической стенки логарифмически зависит от координаты  $r$ , при этом плотность теплового потока  $q$  определяется из закона Фурье

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr} = -\frac{\lambda(T_2 - T_1)}{r \ln(r_2 / r_1)} = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{r \ln(r_2 / r_1)} \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/м·К.

На основании проведенных исследований установлено, что количество теплоты, проходящее сквозь цилиндрическую стенку, отнесенное к единице длины цилиндра, можно определить по формуле

$$Q = qA = q2\pi r = \frac{2\pi\lambda(T_1 - T_2)}{\ln(r_2 / r_1)}, \quad (2)$$

где  $A = 2\pi rl$ , а, при этом  $Q$  зависит от  $r$ , так как теплота аккумулируется в обрабатываемом сырье.

Для получения уравнения, описывающего распространение теплового потока, необходимо найти количество теплоты, проходящего через слой продукта толщиной. Рассмотрим одномерный процесс теплопроводности в цилиндрической стенке обжарочного барабана (рисунок 2).

Условия задачи должны содержать уравнение теплопроводности в форме

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \theta \quad (3)$$

После второго интегрирования получим общее решение уравнения (3).

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (4)$$

Зная теплоемкость продукта и его объем, количество теплоты определяем по уравнению

$$\Delta q = c\Delta v(t - t_1), \quad (5)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость; Дж/кг·град;  $\rho$  – плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – объем сырья, м<sup>3</sup>;  $t_1$  – температура окружающей среды, °С.

Или

$$\Delta q = c\rho 2\pi r l \Delta r (t - t_1) \quad (6)$$

Процесс переноса теплоты в обжарочном барабане представляет собой теплопередачу через многослойную цилиндрическую стенку, термическое сопротивление которой равно сумме сопротивлений отдельных слоев. Тогда можно написать уравнение для определения количества теплоты, проходящего сквозь многослойную цилиндрическую стенку

$$\frac{Q}{l} = q_l = \frac{(T - T_{n+1})}{\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}, \quad (8)$$

где  $n$  – число слоев.

Обобщенное (критериальное) уравнение конвективного теплообмена выражается функцией вида

$$Nu = f\left(\text{Re}, \text{Pr}, \frac{L_1}{L_0}\right), \quad (9)$$

где число  $Pr$  выражает физические свойства продукта и характеризует подобие физических свойств теплоносителей в процессах конвективного теплообмена.

Для установившегося процесса теплообмена при механическом перемешивании обрабатываемого сырья числами  $Fo$  (Фурье),  $Ho$  (гомохронности) и  $Fr$  (Фруда) можно пренебречь.

Тогда для рассматриваемого вида теплообмена уравнение при движении продукта в барабане может быть представлено в виде:

$$Nu = \frac{\alpha_2 D}{\lambda} = C \text{Re}^m \text{Pr}^n \left(\frac{L}{D}\right)^p, \quad (10)$$

где  $D$  – диаметр обжарочного барабана, м;  $L$  – длина обжарочного барабана, м;  $C, m, n, p$  – величины, определяемые из опыта,  $\text{Re} = \omega \cdot L / \nu$  – число Рейнольдса,  $\text{Pr} = \nu / a$  – число Прандтля.

Благодаря большой поверхности твердых частиц солода, теплообмен в слое продукта протекает очень интенсивно, при этом имеет место теплообмен конвекцией и путем теплопроводности внутри самих частиц, что и отражается в числах  $\text{Re}$  и  $\text{Pr}$ .

Количество теплоты  $Q$ , переданной в единицу времени от стенки барабана (греющая среда) к твердым частицам продукта можно определить по уравнению теплоотдачи

$$Q = \alpha_2 F_{ТВ.ч} \Delta t, \quad (11)$$

где  $F_{ТВ.ч}$  – поверхность теплообмена, принимаемая в данном случае равной поверхности твердых частиц в слое;  $\Delta t$  – разность температур стенки барабана и твердых частиц в слое;  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи от стенки барабана к нагреваемым частицам.

Значение  $\alpha_2$  определяется на основе экспериментальных данных, для чего необходимо разработать, смонтировать и запустить в работу специальный лабораторный стенд.

Если  $\alpha_2 = \lambda \cdot Nu / D$ , то тогда

$$Q = \lambda \frac{Nu}{D} F_{ТВ.ч} \Delta t \quad (12)$$

Таким образом, зная значения, мы получаем новое обобщённое критериальное уравнение (10), из которого определяется значение  $i$ , как следствие, величина  $Q$  из уравнения (11).

Из уравнений следует, что интенсифицировать процесс обжарки можно следующим образом: повысить разность температур; увеличив поверхность теплообмена; изготовив барабан из материала с максимальной теплопроводностью; повысить интенсивность перемешивания материала внутри барабана; интенсифицировать процесс теплоотдачи от стенки барабана к нагреваемым частицам; снизить тепловые потери в окружающую среду.

На основании вышеизложенных путей интенсификации процесса обжарки в аппарате барабанного типа, предложены следующие технические решения по усовершенствованию обжарочного аппарата:

– выполнение вала барабана в виде трубы с наружной спиралью, а барабана с внутренней спиралью, наружная и внутренняя спирали имеют противоположное направление витков, при этом площадь нормального сечения спирали барабана равна площади нормального сечения спирали барабана, что позволит интенсифицировать процесс перемешивания продукта в аппарате;

– использование в процессе обжарки продукта насыщенного пара низкого давления (до 150 кПа), который периодически впрыскивается в барабан через отверстия в полой валу, что позволит не только улучшить органолептические показатели солода (убрать горечь), но и интенсифицировать процесс теплоотдачи от стенки барабана к нагреваемым частицам;

применение в конструкции аппарата теплоизолированного кожуха (на основе современных материалов), что снизит тепловые потери в окружающую среду.

УДК: 664.8.039:582.736 (063)

**Шипарева М.Г., кандидат технических наук,**

**Молчанова Е.Н., кандидат биологических наук, Кочиева Д.Р.**

Московский государственный университет пищевых производств, Российская Федерация

### **ВЛИЯНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ОБРАБОТКИ НА АКТИВНОСТЬ ЛЕКТИНОВ СЕМЯН БОБОВЫХ КУЛЬТУР**

Бобовые культуры являются перспективным сырьем в пищевой промышленности. Они обладают уникальным химическим составом – содержат большое количество белка, пищевых волокон, минеральных веществ и витаминов, биологически активных соединений и мало – жира. Бобовые популярны во всем мире, благодаря, широким возможностям для использования. В основном большое потребление бобовых наблюдалось в развивающихся странах в виду их доступности, но в настоящее время и страны с высоким уровнем дохода проявляют интерес к данной культуре из-за ее полезных свойств. Так, например, согласно статистическим данным в странах Евросоюза с 2010 по 2014 год были разработаны почти 3,5 тыс. новых продуктов с использованием различных бобовых. Из новых продуктов более 35% содержали нут, 25% – приходилось на фасоль.

В последние годы Россия стабильно увеличивает урожаи зернобобовых. Например, производство нута, который в значительных масштабах начал возделываться лишь недавно – с 1998 года, в настоящее время составляет более 500 тыс. т. [1].

В то же время семена бобовых являются источником не только полезных веществ, но и различных антиалиментарных соединений, таких как лектины, ингибиторы трипсина,  $\alpha$ -амилазы и др. Поэтому при разработке изделий на их основе необходимо применять такие способы обработки, которые смогли бы снизить антипитательные факторы до безопасного уровня.

В данном исследовании изучали влияние термической обработки на активность лектинов бобовых. Лектины – это гликопротеины, обладающие свойством специфически связывать остатки углеводов на поверхности клеток. В частности они способны склеивать эритроциты крови, поэтому их обычно называют гемагглютинидами. Попадание лектинов в организм человека с продуктами растительного происхождения привести к повреждению слизистой оболочки желудочно-кишечного тракта. Известно, что многие лектины не поддаются действию пищеварительных ферментов и также устойчивы к тепловой обработке, вызывая пищевые отравления [2]. Их наличие является одним из препятствий для применения муки из бобовых в качестве белкового обогатителя в различных выпеченных изделиях.

В качестве образцов использовали некоторые виды фасоли (*Phaseolous vulgaris*): белую, красную пеструю Кидни, черную и нут (*Cicer arietinum*).

Традиционный способ обработки бобовых культур включает в себя замачивание семян и последующую их гидротермическую обработку. При использовании семян бобовых для обогащения хлебобулочных и мучных кондитерских изделий не всегда технологично применять их в отварном виде из-за высокой влажности (около 60%). Использование же сырой муки небезопасно из-за присутствия антипитательных веществ.

Одним из перспективных методов термической обработки является инфракрасный (ИК) нагрев. Ранее были установлены режимы ИК-обработки семян черной фасоли и нута при мощности лучистого потока