

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АППАРАТАХ БАРАБАННОГО ТИПА**

доктор техн. наук., профессор **В. Я. Груданов**, канд. техн. наук, доцент **В. М. Поздняков**,  
БГАТУ, г. Минск, канд. техн. наук, доцент **А. И. Ермаков**, БНТУ, г. Минск

*Слово резюме тире и с маленькой буквы. В данной статье будет рассмотрен вопрос о путях интенсификации тепловых процессов в аппаратах барабанного типа. Выводы и рекомендации основаны на анализе разработанной математической модели процесса переноса теплоты в барабанном обжарочном аппарате.*

*Ключевые слова: теплоотдача, теплопередача, перенос теплоты, интенсификация.*

**Введение.** Математическое моделирование процессов теплообмена в промышленных аппаратах является важнейшей задачей, решение которой позволяет не только описать происходящие процессы, но и наметить пути из интенсификации, что неразрывно связано со снижением энергоемкости процессов и стоимости конечной продукции.

**Основная часть.** Построение математической модели проведем для обжарочного аппарата для производства карамельного солода в условиях небольших пивоваренных предприятий [1-6].

Термическая обработка солода в аппаратах со шнековым перемешиванием осуществляется теплопроводностью, конвективным и лучистым теплообменом. Физическая сущность явления теплопроводности объясняется на основе молекулярно-кинетических представлений: перенос энергии при этом осуществляется вследствие теплового движения и энергетического взаимодействия между микрочастицами, из которых состоит данное сырьё (молекулы, атомы, электроны). Тепловая обработка солода неразрывно связана с распределением температуры внутри тела. Поэтому необходимо, прежде всего, установить понятия температурное поле, градиент температуры, тепловой поток и теплопередача.

Совокупность значений температуры для всех точек объёма обжарочного барабана называется температурным полем, при этом температура должна быть равномерной в направлении координат  $x$ ,  $y$  и  $z$  и постоянной во времени технологического процесса.

В общем случае температура  $t$  является функцией координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и времени  $\tau$ , т.е.

$$t=f(x,y,z,\tau) \quad (1)$$

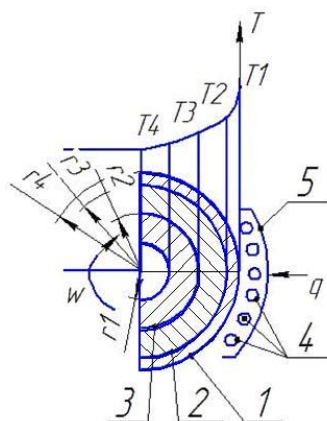
Градиент температур всегда имеет место в реальном тепловом процессе. Температурный градиент является вектором, направленным по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры, °С/м.

Тепловой поток. В обжарочном барабане теплота самопроизвольно переносится от внешнего источника теплоты в сторону убывания температуры – в сторону солода. Количество теплоты, переносимое через цилиндрическую стенку барабана в единицу времени называется тепловым потоком  $Q$ . Тепловой поток, отнесенный к единице площади стенки цилиндра называется плотностью теплового потока  $q$ . Отметим, что плотность потока есть вектор, направление которого совпадает с направлением распространения теплоты в данной точке и противоположно направлению вектора температурного градиента.

Термическая обработка солода в подавляющем большинстве обжарочных аппаратов осуществляется за счет теплопроводности, конвективного и лучистого теплообмена.

При выборе конструкции обжарочного аппарата следует, прежде всего, учитывать процессы переноса теплоты от греющей среды к нагреваемой, при этом должен осуществляться оптимальный тепловой режим.

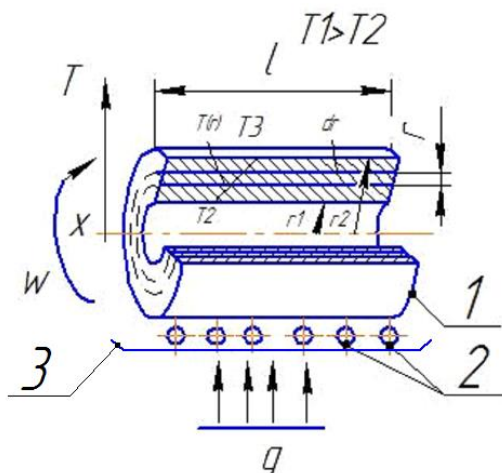
Принимая во внимание конструктивные особенности обжарочного аппарата, можно считать, что в рабочей камере аппарата – обжарочном барабане, имеет место в основном процесс переноса теплоты теплопроводностью, а сам барабан вместе с продуктом представляет собой многослойную цилиндрическую стенку. В этом случае 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.



$\omega$  – 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 1 – Схема распределения температуры по поперечному сечению обжарочного барабана

Рассмотрим одномерный процесс теплопроводности в цилиндрической стенке обжарочного барабана (рисунок 2).



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

Рисунок 2 – Схема одномерного процесса теплопроводности цилиндрической стенки обжарочного барабана

Условия задачи должны содержать уравнение теплопроводности в форме

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

Представим (1) в форме:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \theta \quad (3)$$

и после первого интегрирования получим:

$$r \frac{\partial T}{\partial r} = C_1 \text{ или } \partial T = C_1 \frac{\partial r}{r}, \quad (4)$$

откуда после второго интегрирования получим общее решение уравнения (2).

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (5)$$

Для получения уравнения, описывающего распространения теплового потока, необходимо найти количество теплоты  $\Delta q$ , проходящего через слой продукта толщиной  $\Delta r$ . Зная теплоемкость продукта и его объем, количество теплоты определяем по уравнению

$$\Delta q = c\rho\Delta v(t - t_1), \quad (6)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг град}}$ ;

$\rho$  – плотность продукта,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$v$  – объем сырья,  $\text{м}^3$ ;

$t_1$  – температура окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;

Или

$$\Delta q = c\rho 2\pi r l \Delta r (t - t_1) \quad (7)$$

Однако, согласно закону Фурье

$$\begin{aligned} \Delta q &= -\lambda s \frac{dt(r)}{dr} + \lambda s(r + \Delta r) \frac{dt(r + \Delta r)}{dr} = \\ &= 2\pi\lambda l(r + \Delta r) \frac{dt(r + \Delta r)}{dr} \cdot r \frac{dt(r)}{dr} = 2\pi\lambda h \left( r \frac{d^2t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} \right) \Delta r \end{aligned} \quad (8)$$

В целом, 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

$$\frac{Q}{l} = q_l = (T - T_{n+1}) / \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_i + 1}{r_i}, \quad (9)$$

где  $n$  – число слоев.

Из вышеперечисленных 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;
- интенсифицировав процесс теплоотдачи от стенки барабана к нагреваемым частицам;
- снизить тепловые потери в окружающую среду;
- и др.

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 шнека равна площади нормального сечения спирали барабана, что позволит интенсифицировать процесс перемешивания продукта в аппарате;

- использование в процессе обжарки продукта влажный насыщенный пар низкого давления (до 150 кПа), который будет периодически впрыскиваться в барабан через отверстия в полом 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.

Данные технические решения защищены четырьмя патентами на изобретения Республики Беларусь и реализованы в конструкции нового обжарочного аппарата [7].

Анализ конструктивных, кинематических и технологических параметров разработанного аппарата, оказывающих влияние на процесс обжарки солода, а также математической модели процесса тепловой обработки (5)-(9) позволил выбрать основные факторы варьирования для проведения экспериментальных исследований.

**Заключение.** Интенсифицировать процесс тепловой обработки в аппаратах барабанного типа можно следующим образом: повысить разность температур; увеличив поверхность теплообмена; изготовив барабан из материала с максимальной теплопроводностью; повысить интенсивность перемешивания материала внутри барабана; интенсифицировав процесс теплоотдачи от стенки барабана к нагреваемым частицам; снизить тепловые потери в окружающую среду.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ebiensa, P. Improving the process of roasting malt with intensive stirring machine / Paul Ebiensa, Vladimir Grudanov, Aleksei Ermakov, Vladimir Pozdniakov // Ukrainian Food Journal. – 2015. – Volume 4. Issue 1. – P. 95 – 109.

2. Груданов, В.Я. Технологические особенности производства карамельного солода на новом обжарочном аппарате / В.Я. Груданов, Э.И. Пол Дивейни, В.М. Поздняков, А.И. Ермаков // Агропанорама. – 2015. – № 4. – С. 19 – 23.

3. Ebienna, P. Optimization the process of malt roasting for plant with low productivity / P. Ebienna, V. Grudanov, A. Ermakov, V. Pozdniakov // //Book of abstracts. 83 International scientific conference of young and students “Youth scientific achievements to the 21st century nutrition problem solution”, Kyiv, 5–6 april 2017 p./NUFT. – Kyiv, 2017.– С. 63.

4. Поздняков, В. М. Анализ и оптимизация результатов исследований процесса обжарки солода в установке с интенсивным перемешиванием / В. М. Поздняков, С.А. Зеленко, А.И. Ермаков // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: материалы 13-го междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 15-ой междунар. научно-технической конференции «Наука– образованию производству, экономике, Минск, 26–28 января 2017 г. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталёв [и др.]. – Минск, 2017. – С. 285–290.

5. Поздняков, В.М. Анализ и оптимизация результатов исследований процесса обжарки солода в установках с интенсивным перемешиванием / В.М. Поздняков, А.И. Ермаков, Э.И. Пол Дивейни // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: материалы 12-го междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 14-ой междунар. научно-технической конференции «Наука– образованию производству, экономике, Минск, 28–30 января 2016 г. / БНТУ; редкол.: А.М. Темичев [и др.]. – Минск, 2016. – С. 280–286.

6. Груданов, В.Я. Разработка нового аппарата для обжарки солода/ В.Я. Груданов, В.М. Поздняков, Э.И. Пол Дивейни, А.И. Ермаков // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: сборник статей II междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–27 марта 2015г. / БГАТУ; редкол.: В.Я. Груданов [и др.]. – Минск, 2015. – С. 62–65.

7. Обжарочный аппарат: пат. 17670Респ. Беларусь: МПК А23N12/10 (2006) / Груданов Владимир Яковлевич, Поздняков Владимир Михайлович, ЭбиенфаИмомотими Пол Дивейн; дата публ. 30.12.2012.

УДК 664.282

## **ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАТУРАЛЬНЫХ КРАХМАЛОВ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*А. А. Заболотец, БНТУ, г. Минск, доктор техн. наук, канд. хим. наук В. В. Литвяк, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, Московская обл., Российская Федерация  
канд. техн. наук А. И. Ермаков, БНТУ, г. Минск*

*Особенности строения натурального крахмала зависят от растительного сырья, содержащего крахмал, из которого он получается и обусловлены генетически. Важным достижением современной концепции глубокой переработки такого сырья может послужить разработка инновационной технологии целенаправленного изменения характеристик натурального крахмала без применения каких-либо модифицирующих факторов. Предложен новый, эффективный, экономный и безопасный с точки зрения экологии способ получения комбинаторных натуральных крахмалов, обладающих гибкими и легко изменяемыми характеристиками, учитывающими требования потребителей. Главными преимуществами предлагаемой технологии является надежность, простота и доступность применяемого технологического оборудования, экологическая безопасность и возможность исключения использования в технологическом процессе модифицирующих факторов.*

*Ключевые слова: крахмал, зерно, гранула, комбинаторика, технология.*

**Введение.** В настоящее время принято целенаправленно изменять физико-химические свойства натуральных крахмалов под требования потребителей с использованием физических (температуры, давления, напряжения сдвига и т.д.) или химических (разнообразных химических агентов), или сочетанных модифицирующих факторов [1-7].

Важным достижением современной концепции глубокой переработки растительного крахмалосодержащего сырья может послужить разработка инновационной технологии целенаправленного изменения характеристик натурального крахмала без применения каких-либо модифицирующих факторов.

Цель – разработка способа целенаправленного изменения физико-химических свойств натуральных крахмалов на основе органических технологий.

**Основная часть.** Особенности строения натурального крахмала зависят от растительного сырья, содержащего крахмал, из которого он получается и обусловлены генетически [5]. В свою очередь уникальность физико-химических и органолептических свойств крахмала обуславливаются особенностями его строения. Кроме того, важно учитывать контроль распространения крахмалосодержащего сырья биологическими и климатическими факторами [6].