

Малышкина В.А.
Аспирантка кафедры МАХПП ОГУ,
Попов В.П.
Доцент кафедры МАХПП ОГУ,
Ханин В.П.
Доцент кафедры МАХПП ОГУ

ИЗМЕНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ КАК ФАКТОР, ВЛИЯЮЩИЙ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ПРОЦЕССА ИХ СУШКИ

В статье проведен анализ конвективной сушки макаронных изделий с предварительной гидротермической обработкой и без нее, получены зависимости реологических свойств изделий от продолжительности и интенсивности процесса, даны рекомендации по выбору параметров и продолжительности сушки.

В настоящее время при жесткой конкуренции на рынке сбыта актуальной проблемой всех макаронных фабрик является получение продукта высокого качества. Наиболее продолжительной и важной стадией производства, температурные режимы которой оказывают влияние на качество продукта, является сушка. Как известно, существующие режимы сушки макаронных изделий и способы их интенсификации предполагают конвективный метод подвода энергии для испарения влаги из материала. Однако чрезмерно быстрое осушение поверхностного слоя сырых изделий сухим воздухом может привести к его отслаиванию, к образованию чешуйчатой поверхности, вследствие того, что влага не успевает подойти из внутренних слоев плотной структуры тестовых заготовок. Неравномерное сокращение отдельных слоев сопровождается возникновением значительных внутренних напряжений и, как следствие, уменьшением их линейных размеров. Поэтому чем выше температура воздуха вначале сушки, тем выше должна быть его влажность, а определение допустимых температурных режимов должно базироваться на совместном рассмотрении кинетики сушки с кинетикой изменения реологических свойств продукта.

Для осуществления вышесказанного был исследован процесс обезвоживания макаронных изделий с гидротермической обработкой перед сушкой. В качестве объекта исследования были использованы сырые макаронные изделия группы В первого класса, внешний диаметр 6 мм, длина 150 мм, с добавлением морковного красителя «Куркума». Сначала макаронные изделия сушили конвективным способом, периодически измеряя их температуру, влажность, изменение длины в процессе сушки и определяя относительное удлинение при растяжении и их удельную прочность. Затем такие же макаронные изделия обрабатывали паром в течение 2

мин., при температуре 100-110° С и влажности близкой к насыщению (95-98%), и сушили конвективным способом, анализируя высушиваемые изделия по тем же параметрам.

Предельное относительное удлинение при растяжении определяется как отношение длины пряди в момент разрушения к общей длине пряди до разрушения, умноженное на 100%. Определяли на приборе типа ПМ с использованием соответствующих приспособлений. При этом прядь помещали в специальные держатели и относительное удлинение при растяжении определяли по формуле:

$$\Delta l = \frac{l_n + l_d}{l_n} \cdot 100,$$

где l_n – первоначальная длина образца в момент начала растяжения; l_d – максимальное удлинение пряди по графику зависимости удлинения от прилагаемой нагрузки, выданному пишущим устройством прибора при растяжении образца.

Удельную прочность P_Y (Па) определяли по формуле:

$$P_Y = \frac{P_{\max}}{S},$$

где P_Y – максимальная прилагаемая нагрузка (Н), определяемая по графику прибора; S – поперечное сечение образца (м²).

Кривые конвективной сушки и сушки изделий с пропариванием представлены на рисунке 1.

Анализируя кривую сушки без пропаривания, можно выделить 4 периода:

– в первом периоде, на протяжении первых 5 мин., наблюдается незначительное уменьшение влажности изделий, т. к. происходит процесс разогревания изделий, влага из внутренних слоев устремляется к наружным;

– во втором периоде, от 5 до 30 мин., влажность линейно убывает от 25 до 15,4%. При

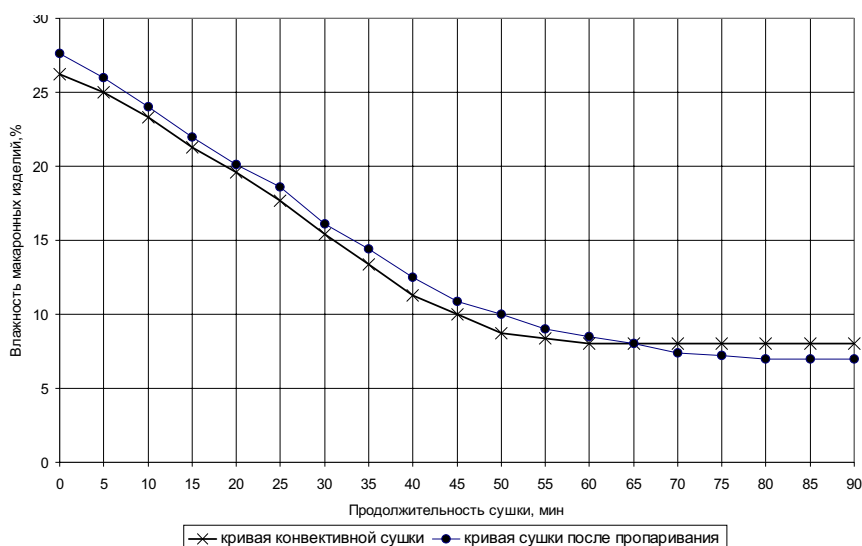


Рисунок 1. Кривые сушки макаронных изделий

этом градиент температуры становится практически равным нулю, происходит интенсивное испарение менее прочно связанной осмотической влаги;

– в третьем периоде, от 30 до 75 мин., влажность изделий убывает от 15,4 до 8%, при этом удаляется влага микрокапилляров и адсорбционно связанная влага, процесс лимитируется малой интенсивностью внутреннего переноса влаги, поверхность испарения интенсивно углубляется внутрь материала;

– в четвертом периоде, от 75 до 90 мин., влажность изделий не изменяется и равна 8%.

Сравнивая эту кривую с кривой сушки после пропаривания, необходимо отметить, что после гидротермической обработки отсутствует период разогревания, т. к. макаронные изделия уже разогреты паром. Начальная влажность изделий повышается при пропаривании, а сам процесс несколько замедляется.

Анализ зависимостей удлинения от прилагаемой нагрузки, полученных при различных влажностях, на приборе типа ПМ позволил выделить 3 этапа с различными реологическими свойствами макаронных изделий:

– на 1 этапе, продолжительностью 20 мин.: при влажности изделий от 26 до 19,6% для изделий без пропаривания, от 27,6 до 20% для изделий после пропаривания данная зависимость наиболее точно описывается реологической моделью Бингама (рис. 2).

Эта модель математически описывается зависимостью:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{(\sigma - \sigma_T)}{\eta_T}, \quad (1)$$

где ε – скорость продольного течения, c^{-1} ;

$\dot{\sigma}$ – скорость изменения нормального напряжения, Па/с;

σ – нормальное напряжение, Па;

σ_T – предел текучести при растяжении, Па;

E – модуль упругости при линейной деформации, Па;

η_T – вязкость при продольном течении, c^{-1} ;

– на втором этапе, от 20 до 30 мин., при влажности изделий от 19,6 до 15,4% для конвективной сушки; от 20 до 35 мин., при влажности изделий от 20 до 16% для сушки с пропариванием вышеуказанные зависимости достаточно точно описываются моделью Максвелла (рис. 3).

Для этой модели справедливо уравнение:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta_T} \quad (2)$$

– на 3 этапе, после 30 мин. сушки при влажности изделий 15,4% и менее – для конвективной сушки, после 35 мин.

при влажности изделий 16% и менее – для сушки после пропаривания, зависимости удлинения от прилагаемой нагрузки имеют линейный характер и описываются моделью Гука (рис. 4):

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (3)$$

где ε – это линейная деформация, мм.

При выборе параметров сушки возникает необходимость определения внутренних напряжений, которые могут выдержать изделия. Автоматизированное определение данных напряжений вызывает значительные трудности ввиду того, что напряжение зависит от поперечного сечения изделий, а как следствие, от его вида. Поэтому является целесообразным измерение линейной деформации с последующим расчетом возникающих при этом напряжений. Эти расчетные зависимости можно получить из уравнений (1), (2), (3) при условии, что измерительное устройство растягивает образец с постоянной скоростью, таким образом $\varepsilon = \text{const}$. Тогда для первого этапа уравнение (1) запишем в виде:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\sigma}{E \cdot dt} + \frac{(\sigma - \sigma_T)}{\eta_T}$$

После преобразования получим дифференциальное уравнение с разделяемыми переменными:

$$\frac{d\sigma}{\sigma - \sigma_T - \dot{\varepsilon}\eta_T} = -\frac{E}{\eta_T} dt$$

Проинтегрировав его, получим:

$$\ln(\sigma - \sigma_T - \dot{\varepsilon}\eta_T) = -\frac{E}{\eta_T} t + C$$

или $\sigma - \sigma_T - \dot{\varepsilon}\eta_T = \left(e^{-\frac{E}{\eta_T} t} \right) \cdot C'$, где $C' = e^C$

или $\sigma = \dot{\varepsilon}\eta_T + \left(e^{-\frac{E}{\eta_T} t} \right) \cdot C' + \sigma_T$

Учитывая, что в начале растяжения $t_0 = 0$ и $\sigma_0 = 0$, имеем:

$$\dot{\varepsilon} \cdot \eta_T + e^0 \cdot C' + \sigma_T = 0,$$

откуда: $C' = -\sigma_T - \dot{\varepsilon}\eta_T$

Окончательное уравнение примет вид:

$$\sigma = (\dot{\varepsilon}\eta_T + \sigma_T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta_T} t} \right)$$

При постоянной скорости сушки, учитывая, что $\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t}$, где $\Delta t = t - t_0 = t$, т. к. $t_0 = 0$

а $\Delta\sigma$ при простом одностороннем растяжении фактически равнозначно Δl , получим:

$$\sigma = \left(\dot{\varepsilon}\eta_T + \sigma_T \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E\Delta l}{\eta_T \dot{\varepsilon}}} \right), \tag{4}$$

где $\Delta l = \frac{l_Y}{l_H} l_Y$ – удлинение изделия, l_H – первоначальная длина.

В данном выражении (4) $\dot{\varepsilon}, \eta_T, \sigma_T, E = \text{const}$, таким образом, в любой момент времени, оп-

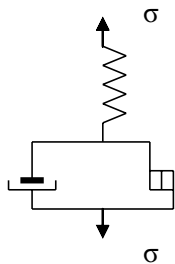


Рисунок 2

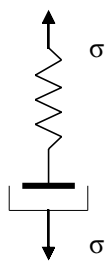


Рисунок 3



Рисунок 4

ределяя относительное удлинение, можно судить о нормальном напряжении σ .

Аналогично для второго участка из уравнения (2) получим:

$$\sigma = \dot{\varepsilon}\eta_T \left(1 - e^{-\frac{E\Delta l}{\eta_T \dot{\varepsilon}}} \right) \tag{5}$$

А для третьего участка из уравнения (3) получим:

$$\sigma = \Delta l E \tag{6}$$

Для сравнения рассмотрены экспериментальные данные, полученные при сушке изделий конвективным способом с предварительной гидротермической обработкой и без нее.

Длина макарон после пропаривания увеличивается на 2%. Изменение длины в процессе сушки показано на рис. 5

Относительное удлинение при растяжении с пропариванием и без него показано на рисунке 6.

Следует отметить, что после гидротермической обработки изделия имеют большую длину и больше растягиваются.

Зависимость удельной прочности от времени сушки представлена на рис. 7.

Анализ зависимостей изменения длины макаронных изделий, относительного удлинения и удельной прочности в процессе сушки показывает, что для вышеуказанных этапов изменения реологических свойств данные зависимости имеют разный характер:

- на первом этапе, когда макаронные изделия являются упруго-вязко-пластичным телом, длина изделий и относительное удлинение линейно убывают, а удельная прочность линейно возрастает;
- на втором этапе они являются вязко-пластичным телом, наблюдается более медленное уменьшение длины и относительного удлинения изделий и более медленное увеличение их удельной прочности;
- на третьем этапе, когда макаронные изделия становятся упругим телом, их длина, относительное удлинение и удельная прочность постоянны.

Анализ качества готовых изделий показал, что изделия, обработанные паром, в сравнении с изделиями, высушенными без обработки, имеют глянцевую поверхность без трещин и более светлый цвет.

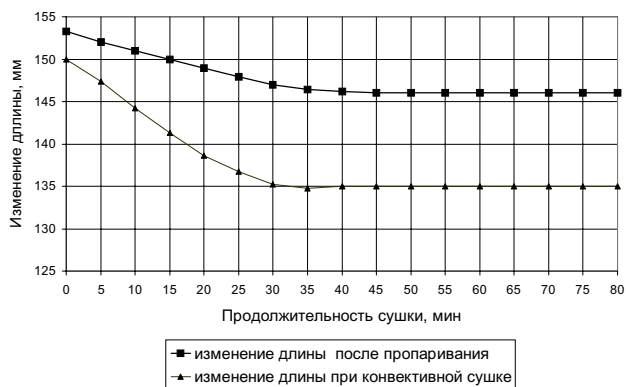


Рисунок 5. Изменение длины макаронных изделий в процессе сушки

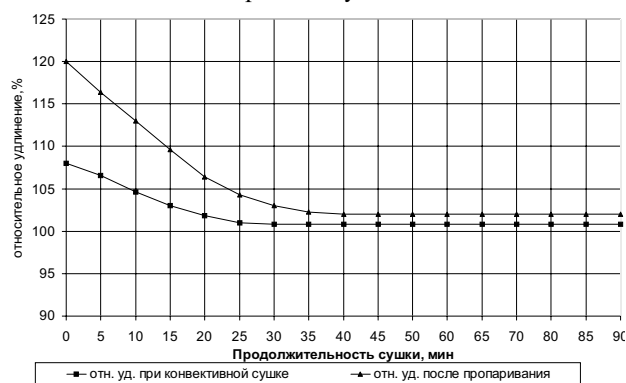


Рисунок 6. Кривые зависимости относительного удлинения при растяжении от времени сушки

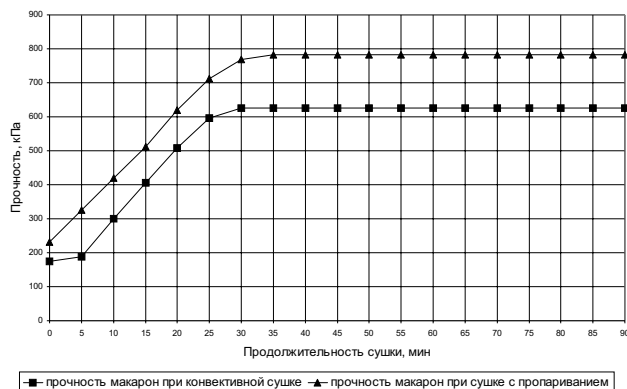


Рисунок 7. Кривые зависимости удельной прочности от времени сушки

Таким образом, анализ процесса потери влаги макаронными изделиями показал, что гидротермическая обработка позволит получить более высококачественный продукт, а по изменению его реологических свойств можно судить о необходимой продолжительности процесса до максимально возможных границ. Для этого, в любой момент времени определяя относительное удлинение, можно судить о внутренних напряжениях, которые могут выдержать изделия.

Список использованной литературы:

1. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. - М.: Пищевая промышленность, 1973. – 178 с.
2. Медведев Г.М. Технология макаронного производства. – М.: Колос, 1999. – 272 с.
3. Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с. ил.