

УДК 66.047:664.691

Кинетическая оценка и оптимизация процесса сушки 3D-печатных макаронных изделий

¹ Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:
Мартеха Александр Николаевич
Адрес: 127434, г. Москва,
ул. Тимирязевская, 49
E-mail: man6630@rgau-msha.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:
данные текущего исследования
доступны по запросу
у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Мартеха А. Н., & Каверина Ю. Е. (2022).
Кинетическая оценка и оптимизация
процесса сушки 3D-печатных
макаронных изделий. *Хранение
и переработка сельхозсыревья*, (2), 161-
172. [https://doi.org/10.36107/10.36107/
spfp.2022.295](https://doi.org/10.36107/10.36107/spfp.2022.295)

ПОСТУПИЛА: 15.03.2022

ПРИНЯТА: 26.05.2022

ОПУБЛИКОВАНА: 30.06.2022

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
авторы сообщают об отсутствии
конфликта интересов.



А. Н. Мартеха¹, Ю. Г. Каверина¹

АННОТАЦИЯ

Введение. Моделирование наплавленным осаждением - наиболее часто используемая технология 3D-печати в пищевой промышленности. В этой технологии параметры печати и структурно-механические свойства продукта, предназначенного для печати, играют важную роль в качестве конечного продукта.

Цель. Данное исследование было направлено на использование процесса сушки в качестве инструмента для улучшения качества 3D-печати макаронных изделий. Целью данной работы было оценить влияние режимных параметров процесса сушки и найти их оптимальные значения для обеспечения качества макаронных изделий, полученных путем 3D-печати.

Материалы и методы. Объектом исследования настоящей работы были макаронные изделия, полученные в результате 3D-печати. Для локального нагрева экструдированного продукта используется сушка горячим воздухом и инфракрасным нагревом. Для оптимизации процесса сушки применялась методология поверхности отклика. В качестве основных переменных, влияющих на процесс сушки, были выбраны: мощность нагрева, время обработки и расстояние от источника нагрева. Максимальная потеря массы продукта в сочетании с максимальной температурой ниже 100 °C в течении всего времени обработки составляет задачу оптимизации.

Результаты. Получены уравнения регрессии и поверхности отклика для сушки горячим воздухом. При времени обработки 1,5 мин, значение мощности нагрева составляет 2 ед., а расстояния от подложки до источника нагрева 1,77 см. Отмеченные значения независимых переменных для функции отклика можно считать оптимальными. При этих параметрах обеспечивается температура подложки 140,6 °C, максимальная температура в центре образца 97,9 °C и потеря массы образца 17,7%.

Выводы. Результаты исследования могут быть адаптированы для пищевых продуктов с измененной текстурой, в зависимости от условий постобработки, которым она подвергается.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

оптимизация, сушка, 3D печать, постобработка, макаронные изделия

Kinetic Evaluation and Optimization of the Drying Process of 3D Printed Pasta

¹ Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural
Academy

Alexander N. Martekha¹, Yuliya Eu. Kaverina¹

ABSTRACT

CORRESPONDENCE:

Alexander N. Martekha
49, Timiryazevskaya, Moscow, 127434,
Russian Federation
E-mail: man6630@rgau-msha.ru

FOR CITATIONS:

Martekha A. N., & Kaverina Yu. E. (2022). Kinetic evaluation and optimization of the drying process of 3D printed pasta. *Storage and processing of Farm Products*, (2), 161-172.
<https://doi.org/10.36107/10.36107-spfp.2022.295>

RECEIVED: 15.03.2022

ACCEPTED: 26.05.2022

PUBLISHED: 30.06.2022

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST:
none declared.



Background. Fused deposition modeling is the most commonly used 3D printing technology in the food industry. In this technology, the printing parameters and the structural-mechanical properties of the product to be printed play an important role in the quality of the final product.

Purpose. This study aimed to use the drying process as a tool to improve the quality of pasta 3D printing. The purpose of this work was to evaluate the influence of the regime parameters of the drying process and find their optimal values to ensure the quality of pasta obtained by 3D printing.

Materials and Methods. The object of research in this work was pasta obtained as a result of 3D printing. For local heating of the extruded product, hot air drying and infrared heating are used. Response surface methodology was applied to optimize the drying process. The following were chosen as the main variables affecting the drying process: heating power, processing time and distance from the heating source. The maximum weight loss of the product, combined with the maximum temperature below 100 °C during the entire processing time, constitutes an optimization challenge.

Results. Regression equations and response surfaces for hot air drying are obtained. With a processing time of 1.5 min, the value of the heating power is 2 units, and the distance from the substrate to the heating source is 1.77 cm. The noted values of the independent variables for the response function can be considered optimal. With these parameters, the substrate temperature is 140.6 °C, the maximum temperature in the center of the sample is 97.9 °C, and the sample mass loss is 17.7%.

Conclusions. The results of the study can be adapted for food products with modified texture, depending on the post-processing conditions to which it is subjected.

KEYWORDS

optimization, drying, 3D printing, post-processing, pasta

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к применению аддитивного производства в пищевой индустрии значительно вырос за последние 10 лет. В этой области аддитивная технология представляет собой важный инструмент для создания продуктов с контролируемой структурой и текстурой, имея достаточные знание состава печатного материала, его реологических характеристик (Бредихин и др., 2021а; Бредихин и др., 2021б; Дресвянников и др., 2017; Прибытков и др., 2015).

Моделирование наплавленным осаждением — наиболее часто используемая технология 3D-печати в пищевой промышленности. В этой технологии параметры печати и структурно-механические свойства продукта, предназначенного для печати, играют важную роль в качестве конечного продукта (Severini et al., 2016; Благовещенский и др., 2020). Тесто из пшеничной муки было одним из первых пищевых материалов, успешно напечатанных в трехмерном виде. В какой-то степени тесто зерновых культур сочетает в себе свойства истечения при сдвиге, необходимые на этапе экструзии в процессе печати (Jiang et al., 2019). Эти свойства связаны с содержанием компонентов пшеничной муки в тесте в сочетании со структурирующим эффектом белков при комнатной температуре, полученным при замесе, и, в меньшей степени, многочисленных гранул крахмала, диспергированных в тесте (Cappelli et al., 2020). Структура белков клейковины зависит в основном от содержания влаги, процесса смешивания и может привести к образованию эластичной сети белков, в которую встроены гранулы крахмала (Vanin et al., 2018; Hackenberg et al., 2018). В настоящее время пшеничная мука является одним из перспективных печатных материалов, из-за способности муки связывать воду, и способности белков муки взаимодействовать между собой и образовывать вязкоэластичные глютеновые сети (Kim et al., 2019; Severini et al., 2018; Yang et al., 2018; Zhang et al., 2018; Krishnaraj et al., 2019; Бредихин и др., 2021в).

Среди параметров печати, контроль температуры является ключевым, как в процессе экструзии, так и во время сушки после осаждения (Sun et al., 2018; Demei et al., 2022). В свою очередь, качество макаронных изделий во многом зависит от рационального проведения их стабилизации после сушки и компенсации разброса влажности в слоях конеч-

ного продукта. Печать макаронного теста, может выполняться горячим способом, чтобы сократить время, необходимое для постпечатной термообработки (Mann et al., 2014). Интересным представляется интеграция процесса сушки макаронных изделий непосредственно в 3D-принтер.

Можно выделить два вида сушки, соответствующие двум разным разработкам 3D-принтеров. Первый подразумевает локальный нагрев или сушку слоя материала, выдавленного принтером, при этом каждый слой будет сушиться одновременно с его нанесением на подложку. Второй способ предусматривает общий нагрев печатаемого объекта и заключается в сушке всего объекта после печати (Demei et al., 2022).

Сушка позволит изменить структуру зернового материала на более жесткую. Кроме того, повышение температуры также приводит к улучшению вкусовых свойств за счет реакции Майера или карамелизации сахаров (Wähly & Skjöldebrand, 2002). В современной технике для выпечки пшеничного теста, физические процессы сочетаются с физико-химическими реакциями, такими как желатинизация крахмала и денатурация белков муки. В зерновом сырье желатинизация крахмала и денатурация белка происходят во время термомеханического процесса (Allan et al., 2018; Perry & Donald, 2002). Основная цель термической обработки, применяемой к материалу после печати — удалить влагу из материала. При уменьшении влагосодержания в продукте крахмал и глютен переходят из каучукового состояния, в котором они деформируются, в хрупкое твердое состояние при охлаждении. Этот переход между состояниями напрямую влияет на текстуру мучных продуктов (Wang et al., 2017; Auger et al., 2008).

Макаронные изделия, полученные путем механической обработки, показывают хорошую способность к экструзии, но экструдированный слой деформируется под своим весом и весом слоев, нанесенных впоследствии. Таким образом, эта «сырая» паста несовместима с нанесением 3D-печати слой за слоем. Этап структурирования во время печати необходим для использования теста в качестве пищевого материала (Dessev et al., 2011). Сочетание различных тепломассообменных процессов в одном принтере будет актуальным для печати пищевых продуктов с разной текстурой путем со-

чтения печати и сушки пищевых продуктов. Затем мы предполагаем, что печать материала при температуре выше комнатной сократит время сушки после печати и общее время печати пищевых продуктов.

Исходя из этого контекста, данное исследование было направлено на использование процесса сушки в качестве инструмента для улучшения качества 3D-печати макаронных изделий. Целью данного исследования было оценить влияние режимных параметров процесса сушки и найти их оптимальные значения для обеспечения качества макаронных изделий, полученных путем 3D-печати. Задача исследования состоит в том, чтобы улучшить печатные характеристики макаронного теста за счет увеличения его вязкости с помощью желатинизации крахмала и денатурации белка во время печати. Для этого необходимо управлять текстурой слоя печатного материала путем изменения его структуры на этапе сушки после печати.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект

Объектом исследования настоящей работы были макаронные изделия, как один из самых распространенных мучных продуктов питания во всем мире.

Пшеничную муку (содержание влаги 14,6% и белки 11,3%) и дистиллиированную воду смешивали с образованием теста с использованием планетарного миксера с подогревом (Thermomix TM6, Vorwek, Германия), оборудованного листовой мешалкой. Температура нагрева емкости смесителя поддерживалась на уровне 85–90 °С. К муке добавляли часть воды и перемешивали в смесителе на скорости 125 об/мин в течение 4 минут с получением теста с 50% влажностью. Затем к этому тесту добавляли вторую часть воды и перемешивали еще 12 минут для получения теста с влажностью 56%. Этот процесс применялся для повышения стабильности теста с течением времени и предотвращения фазового разделения теста. Описанные ниже процессы термообработки проводились на единственном цилиндрическом слое экструдированного тестового материала, который в дальнейшем будем называть нитью.

Оборудование и инструменты

Для локального нагрева экструдированной нити используется сушка горячим воздухом и инфракрасным нагревом. Тепловая пушка (GHG 600 CE Bosch Professional, Германия) с 6 уровнями регулировки температуры размещается на стреловом кране (Рисунок 1B), установленном на подложке с керамическим покрытием. Расстояние между подложкой и соплом тепловой пушки можно регулировать. Инфракрасная лампа (инфракрасный кварцевый нагреватель FQE 200, Ирландия) обеспечивает излучение (диапазон излучения: от 1,5 до 8 мкм, с максимальным излучением в 5 мкм) мощностью 200 Вт. Лампа установлена на отражателях из нержавеющей стали, позволяющих концентрировать волны под источником излучения (Рисунок 1A).

В качестве подложки для испытаний с ИК-нагревом использовалась поверхность из тефлона (Рисунок 1A и 1C). Для сушки горячим воздухом выбрана керамическая подложка, температура которой измеряется во время эксперимента. Керамическая подложка выбрана из-за ее простоты использования и ее тепловых свойств (более быстрое охлаждение, чем подложка из тефлона).

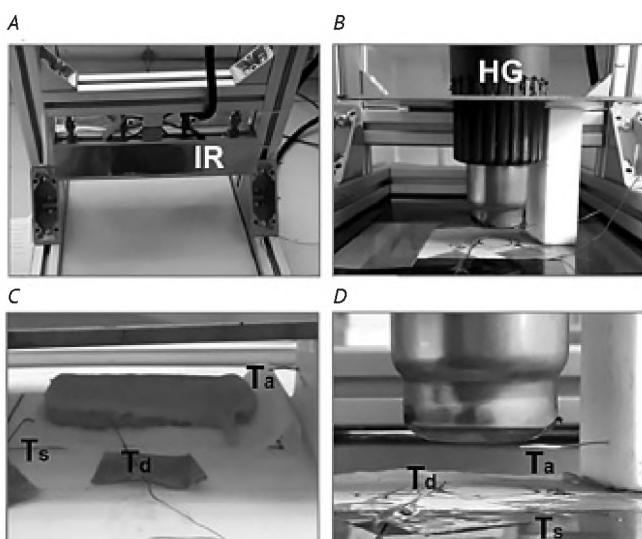


Рисунок 1

Размещение нагревательных приборов для локальной сушки. (A) – с ИК-лампой и подложкой из тефлона, (B) – с тепловой пушкой и керамической подложкой, (C) – размещение термопар под ИК-лампой, (D) – размещение термопар под тепловой пушкой. HG – тепловая пушка; IR – инфракрасная лампа, T_d – термопара для измерения температуры нити; T_s – термопара для измерения температуры подложки; T_a – термопара для измерения температуры воздуха.

Нить диаметром 4 мм (размер наконечника сопла) помещена под источники нагрева. Термопары типа K (Термоэлемент, Россия) предназначены для измерения температуры нити, температуры подложки и температуры воздуха под зоной нагрева (Рисунок 1С и 1Д). Термопары закрепляются в местах измерения с помощью термоклейкой ленты или на блоке из тефлона. Термопара для измерения температуры воздуха располагается на расстоянии 0,8 см от подложки под тепловой пушкой и 1,5 см от подложки под инфракрасной лампой. Термопара для определения температуры нити приподнята относительно подложки, чтобы облегчить ее проникновение вовремя осаждения слоя продукта. Измерение температуры с течением времени выполняется считывателем термопар (Fluke 8845A, Fluke Corporation, USA) со скоростью измерения 1 точка/2 с. Измерения записываются с помощью программного обеспечения Fluke 884x Firmware, USA).

Методы

Кинетика потери массы и внутренней температуры нити макаронного теста под инфракрасной лампой измеряется на разных расстояниях от нити. Стабилизация температуры подложки зависит от расстояния до лампы. Время стабилизации температуры подложки составляет 22 мин при расстоянии до лампы 8 см, 20 мин при 5 см и 15 мин при 2 см. В течение 5 минут после осаждения регистрируют изменение температур воздуха, подложки и нити. Хрупкость нити оценивают путем разрезания скальпелем.

Исследование эффективности сушки горячим воздухом проводится методом расчета поверхности отклика. Было проведено планирование эксперимента, позволяющее варьировать всеми переменными и получать количественные оценки эффектов их взаимодействия (Прибытков и др., 2015). В качестве основных переменных, влияющих на процесс сушки, были выбраны: мощность нагрева (P), время обработки (t) и расстояние от источника нагрева (D). В таблице 1 показаны исследуемые переменные, а также их уровни.

Нижняя и верхняя границы плана для мощности нагрева составляла от 1 до 3 ед. (1 ед. – 55 (\pm 16); 2 ед. – 130 (\pm 14) °C; 3 ед. – 212 (\pm 18) °C), для расстояния от подложки до тепловой пушки от 1 до 3 см и времени обработки от 0,5 до 2,5 мин. Выбор ин-

Таблица 1

Пределы изменения входных переменных

Переменные	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень
Мощность нагрева (ед)	1	2	3
Время обработки (мин)	0,5	1,5	2,5
Расстояние (см)	1	2	3

тервалов изменения переменных обусловлен технологическими условиями процесса сушки и техническими характеристиками экспериментальной установки. Критериями оценки влияния различных переменных на процесс сушки были выбраны: потеря массы нити (W_L), %; максимальная температура в центре нити (T_{max}), °C; температура подложки (T_s), °C. Таким образом, максимальная потеря массы нити в сочетании с максимальной температурой в центре нити ниже 100 °C в течении всего времени обработки составляет задачу оптимизации.

Анализ данных

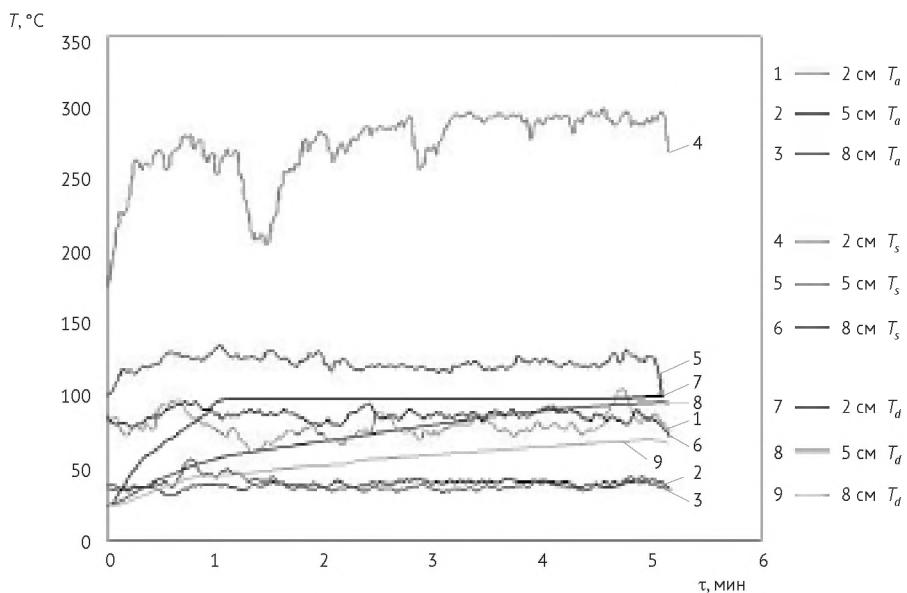
Для планирования и анализа экспериментальных исследований, а также для визуализации данных поверхностей отклика используется программное обеспечение статистического анализа Statistica (StatSoft, USA). Для каждой модели рассчитываются коэффициенты регрессии. Для оценки эффективности модели выполняется дисперсионный анализ (ANOVA) при уровне значимости 5 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ

ИК-сушка

Температурная кинетика, а также потеря массы после сушки в зависимости от расстояния от ИК-лампы до подложки представлены на Рисунке 2.

Расстояние до лампы влияет на температуру подложки, нити и потери массы нити. Чем ближе лампа к нити, тем выше температура подложки: около 87 °C (\pm 4 °C), 120 °C (\pm 1 °C) и 290 °C (\pm 4 °C) соответственно для 2, 5 и 8 см. На расстоянии 5–8 см температура воздуха составляет около 40 °C (\pm 2 °C) и повышается до 80 °C (\pm 6 °C), когда лампа на-

**Рисунок 2**

Температурные кривые нити, расположенной на подложке из тefлона при сушке инфракрасной лампой на расстоянии 2, 5 и 8 см от источника излучения

ходится на расстоянии 2 см от подложки. Нагрев воздуха происходит в основном из-за резкого повышения температуры подложки. Точно так же температура нити увеличивается, когда лампа приближается к подложке. На расстоянии 8 см температура нити не превышает 70°C в течение 5 минут 30 секунд нагрева. Для расстояний 5 и 2 см температура нити достигает 90°C за 4 мин 30 с и 5 мин с соответственно. Начальный наклон температуры нити, как функции времени, увеличивается по мере уменьшения расстояния от лампы до подложки. Уменьшение расстояния от подложки до лампы с 5 до 2 см приводит к значительному изменению кинетики повышения температуры нити, которая обратно пропорциональна расстоянию между образцом и лампой, что согласуется с литературными данными (Nowak & Lewicki, 2004). Со временем температура нити приближается к температуре воздуха. Образование корки на поверхности нити замедляет повышение температуры в центре нити. Однако при расстоянии до лампы 2 см корка образуется очень быстро, и температура нити достигает 100°C за 1 мин 36 с и поддерживается на этом уровне из-за большого количества испарения влаги (Wagner et al., 2007).

Хрупкость нити оценивают путем разрезания скальпелем. Сушка на расстоянии 8 см и выдержка в течении 5 мин 30 с позволяет образовать мелкую корку на нити, подвергнутой воздействию инфракрасного нагрева. При этом часть нити, обращенная к подложке, имеет мягкую структуру. При резке

нить имеет склонность к деформации, которая снижается при приближении лампы на расстоянии 5 см от подложки. При приближении к лампе на расстоянии 2 см от подложки нить становится жесткой, ломкой и рыхлой. При расстояниях 8 и 5 см повышение температуры ведет к постепенному переносу влаги от центра к поверхности с образованием корки. В этих условиях можно предположить, что потеря массы в основном отражает потерю влаги, которая составляет 16,5% и 28,6% при расстоянии от лампы 8 и 5 см соответственно. Влагосодержание нити составляет 54,5%, когда лампа расположена на расстоянии 8 см от подложки, и 47,3% при расстоянии 5 см от подложки, при этом время обработки составило 5 мин 30 с.

Таким образом, расстояние от источника ИК-излучения до нити позволяет регулировать интенсивность сушки. Текстура и цвет нити могут быть изменены в зависимости от расстояния от источника и времени обработки. Проникновение инфракрасных волн вызывает значительное повышение температуры поверхности, обращенной к источнику, по сравнению с центральной частью образца. Инфракрасный нагрев, как вид локальной сушки, может быть рекомендован, когда необходимо получить продукт с коркой на поверхности и мягкой текстурой внутри. Для использования инфракрасного метода нагрева в контексте сушки после 3D-печати необходимо провести оптимизацию параметров мощности лампы, характера инфракрасного излучения, расстояния и времени.

Сушка горячим воздухом

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие данный процесс под влиянием исследуемых переменных. Уравнение потери массы имеет вид:

$$\begin{aligned} W_L = & 17,98 + 15,02 \cdot (P - 2) + 1,05 \cdot (D - 2) + \\ & + 7,96 \cdot (\tau - 1,5) + \\ & - 3,94 \cdot (P - 2)(D - 2) + 7,11 \cdot (P - 2)(\tau - 1,5) + \\ & + 4,81(P - 2)^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Мощность нагрева оказывает значительное влияние на все измеренные характеристики. Это фактор, от которого наиболее сильно зависят все результаты. Время — второй фактор, оказывающий наибольшее влияние на процесс сушки, в частности на потерю массы. Влияние расстояния от зоны нагрева до продукта наименее значимо. Этот анализ позволяет сделать вывод, что температуры нити и подложки в основном зависят от мощности нагрева, а потеря массы зависит от трех изученных переменных.

Характер изменения выходных параметров от изменяемых переменных представлена поверхностьюми отклика на Рисунках 3–7.

Из Рисунка 3 видно, что влияние расстояния на потерю массы зависит от подаваемой мощности

нагрева. При мощности нагрева 1 ед. потеря массы увеличивается с увеличением расстояния до подложки, а при мощности нагрева 3 ед. потеря массы увеличивается с уменьшением расстояния. Влияние продолжительности обработки на потерю массы нити также зависит от мощности нагрева (Рисунок 4). При мощности нагрева 1 ед. потеря массы с течением времени резко не увеличивается. Для мощности нагрева 3 ед. потеря массы с течением времени быстро увеличивается. При кратковременном воздействии (0,5 мин) увеличение потери массы начинается при увеличении мощности нагрева до 2 ед. При длительном нагревании (2,5 мин) увеличение потери массы наблюдается при мощности нагрева выше 1 ед. Согласно уравнению (1) потеря массы составляет 11% для наименее интенсивной сушки ($P = 1$ ед, $D = 3$ см, $\tau = 0,5$ мин), 19% для средней интенсивности ($P = 2$ ед, $D = 2$ см, $\tau = 1,5$ мин) и 55% для наиболее интенсивной сушки ($P = 3$ ед, $D = 3$ см, $\tau = 2,5$ мин). При низкой мощности нагрева время обработки не влияет на потерю массы, а большее расстояние от источника нагрева позволяет нити высыхать более эффективно. Напротив, при использовании максимальной мощности нагрева потеря влаги будет иметь максимальное значение для наименьшего расстояния и длительного времени обработки.

Максимальная температура в центре нити в основном зависит от мощности нагрева (Рисунок 5, 6).

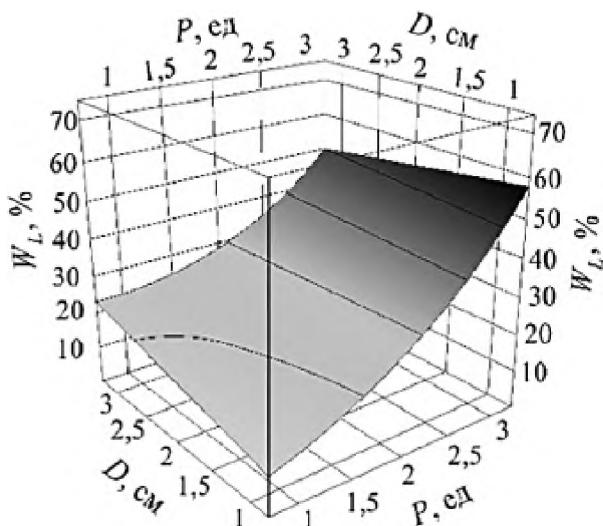


Рисунок 3

Зависимость потери массы от расстояния и мощности нагрева

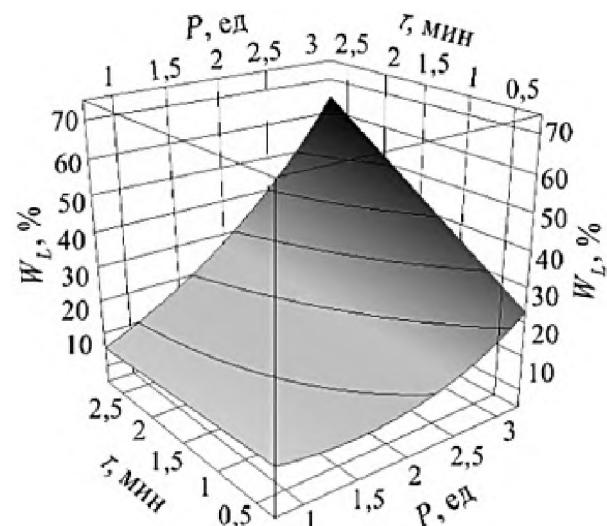
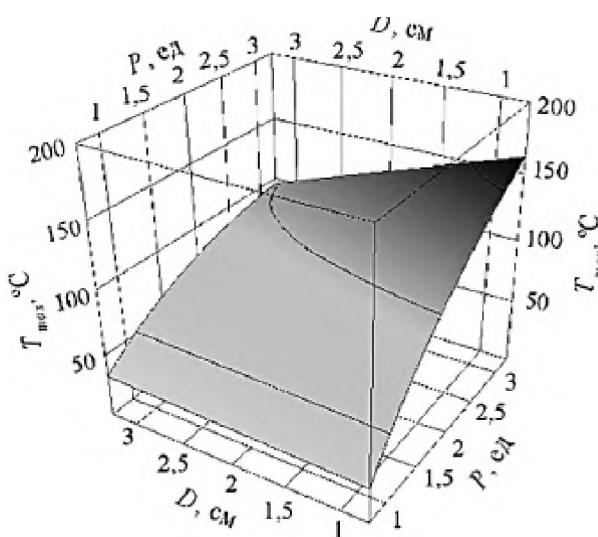
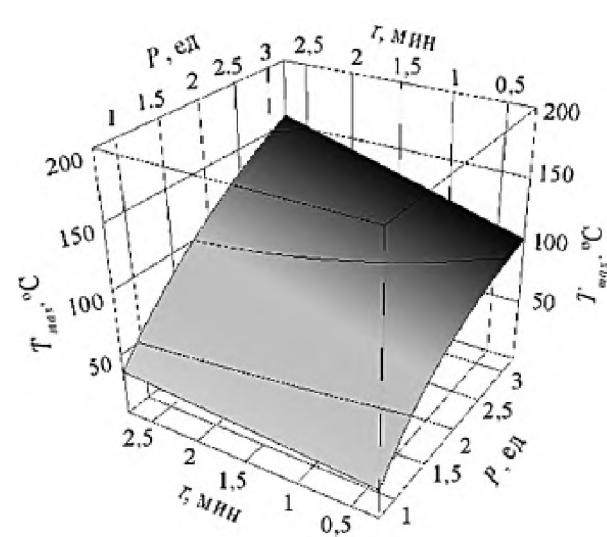


Рисунок 4

Зависимость потери массы от времени обработки и мощности нагрева

**Рисунок 5**

Зависимость максимальной температуры нити от расстояния и мощности нагрева

**Рисунок 6**

Зависимость максимальной температуры нити от времени обработки и мощности нагрева

Если источник нагрева расположен на расстоянии 1 см от подложки, то с увеличением мощности достигается максимальная температура нити. Аналогичным образом, при времени обработки 2,5 мин с увеличением мощности достигается максимальная температура нити. При постоянной мощности нагрева уменьшение расстояния и увеличение времени обработки приводят к увеличению максимальной температуры в центре нити. Уравнение

максимальной температуры в центре нити, как функции трех переменных приведено ниже:

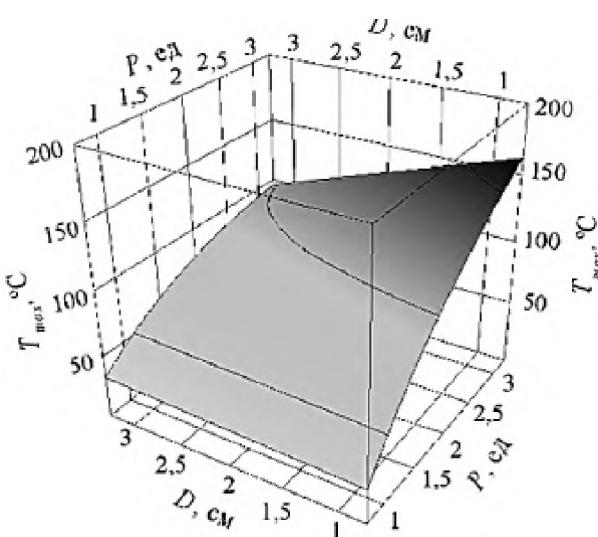
$$\begin{aligned} T_{\max} = & 95,15 + 40,79 \cdot (P - 2) + 12,13 \cdot (D - 2) + \\ & 13,33 \cdot (\tau - 1,5) \\ & - 11,62 \cdot (P - 2)(D - 2) + 6,53 \cdot (P - 2)(\tau - 1,5) + \\ & + 10,04(P - 2)^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Из уравнения (2) можно сделать вывод, что расстояние до источника нагрева и время обработки оказывают значимое влияние на максимальную температуру в центре нити только при значении мощности нагрева в 3 ед. Исходя из поверхности отклика, как функции расстояния и мощности нагрева, температура подложки увеличивается почти линейно с увеличением мощности нагрева (Рисунок 7).

Уравнение регрессии для определения температуры подложки, как функции трех переменных представлено ниже:

$$\begin{aligned} T_s = & 140,06 + 85,17 \cdot (P - 2) - 2,16 \cdot (D - 2) + \\ & + 2,47 \cdot (\tau - 1,5) \\ & - 0,72 \cdot (P - 2)(D - 2) + 0,65 \cdot (P - 2)(\tau - 1,5) + \\ & + 6,72(P - 2)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает, что при расстоянии 2 см от источника нагрева, регулируя мощность нагрева от 1 до 3 ед, получим значения температуры подложки 61,61°C; 140,06°C и 231,9°C соответственно.

**Рисунок 7**

Зависимость температуры подложки от расстояния и мощности нагрева

но. Температура подложки не зависит от времени воздействия и расстояния от источника нагрева. На основе задачи оптимизации и регрессионных моделях, полученных для каждого отклика, были установлены оптимальные параметры. При времени воздействия 1, 1,5, 2,3 и 2,5 мин, температура подложки зафиксирована на уровне 100, 140, 160 и 180 °C соответственно, а максимальная температура в центре нити близка к 100 °C для всех моделей. При времени обработки 1,5 мин, значение мощности нагрева составляет 2 ед., а расстояния от подложки до источника нагрева 1,77 см. Отмеченные значения независимых переменных для функции отклика можно считать оптимальными. При этих параметрах обеспечивается $T_s = 140,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} = 97,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $W_L = 17,7\text{ \%}$.

Изученное в данной работе устройство обеспечивает гибкость параметров сушки, позволяя лучше контролировать изменение цвета макаронных изделий и образование корки, в зависимости от температуры воздуха, расстояния от источника нагрева и времени обработки. Однако, используя данный метод сушки, не удается получить твердую структуру объекта в течении времени, предусмотренного планом эксперимента. Предлагается увеличить время воздействия на объект путем выполнения нескольких обходов осажденного слоя, например, с помощью устройства для сушки импульсным воздухом. Устройство имеет возможность отслеживать движения печатающего сопла, что позволит удалять влагу во время импульсов горячего воздуха и между ними. Диффузия влаги из центра слоя к поверхности между двумя пульсациями воздуха позволит ограничить быстрое образование корки на поверхности слоя.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сушка горячим воздухом позволяет уменьшить исходную массу на 15–35%, в зависимости от температуры подложки и времени обработки, которое варьируется от 0,5 до 2,5 мин. Локальная сушка горячим воздухом сочетает в себе быстрое воздействие микроволн и возможность образования тонкой корки на поверхности слоя, чего нельзя добиться в случае сушки только с помощью микроволн или в сочетании с инфракрасным излучением. Наши результаты находят подтверждение в исследованиях авторов (Chhanwal et al.,

2019). Вместе с тем, резкие условия сушки позволяют наблюдать образование тонкого слоя (корки) с низкой проницаемостью. Параллельно с образованием корки внутренняя температура нити продолжает повышаться, что приводит к испарению влаги за счет прохождения точки кипения. Сочетание этих двух явлений (образование непроницаемого слоя на поверхности и образование газов) вызывает деформацию нити при сушке. Ранее об этом были частичные упоминания у авторов (Demei et al., 2022).

ВЫВОДЫ

В данном исследовании были изучены два метода локальной сушки в сочетании с горячей печатью. Инфракрасная сушка дает преимущество при сушке слоя макаронного теста толщиной в несколько миллиметров и приводит к образованию более сухой и жесткой поверхности. Образование тонкой корки на поверхности печатного материала может способствовать разнообразию текстуры печатных пищевых продуктов, а также уменьшить липкость между слоями нанесенного материала.

Локальная сушка горячим воздухом открывает целый ряд возможностей для контроля физико-механических свойств печатных пищевых продуктов. Мы показали, что этот метод позволяет быстро уменьшить влагосодержание в материале, ограничивая развитие корки. Однако высокое начальное влагосодержание является ограничивающим фактором для получения твердого и хрупкого материала. Сушку можно производить во время 3D-печати, адаптируя печать так, чтобы при нанесении одного слоя можно было сделать несколько проходов горячего воздуха (Гришин и др., 2016; Семенов и др., 2021).

По сравнению с результатами, приведенными в литературе, скорость потери массы, для приведенных выше методов сушки, имеет высокое значение. Однако, конечное влагосодержание после термообработки остается высоким. С одной стороны, увеличение скорости испарения влаги позволяет сократить время обработки, что открывает возможность быстрого нагрева слоя макаронного теста. С другой стороны, сокращение времени обработки не позволяет снизить влагосодержание, необходимое для затвердевания теста.

В соответствии с этими критериями следует оптимизировать время сушки напечатанных слоев макаронного теста для получения твердой и хрупкой текстуры.

Информация, представленная в этой работе, будет очень полезна при производстве и постобработки

3D-печатных мучных продуктов питания. Кроме того, результаты исследования могут быть адаптированы для пищевых продуктов с измененной текстурой, в зависимости от условий постобработки, которым она подвергается.

ЛИТЕРАТУРА

- Благовещенский, И. Г., Шибанов, Э. Д., & Загородников, К. А. (2020). Оптимизация 3D-печати на примере использования шоколадной глазури. *Пищевая промышленность*, 12, 70–73. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10147>
- Бредихин, С. А., Антипов, С. Т., Андреев, В. Н., & Мартеха, А. Н. (2021а). Влияние реологических характеристик на качество 3D-печати пищевых паст. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 83(2), 40–47. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-2-40-47>
- Бредихин, С. А., Андреев, В. Н., Мартеха, А. Н., & Березовский, Ю. М. (2021б). Корреляция реологических свойств с качеством трехмерной печати шоколадной. *Ползуновский вестник*, 3, 111–116. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.015>
- Бредихин, С. А., Андреев, В. Н., Мартеха, А. Н., & Каверина, Ю. Е. (2021в). Оптимизация трехмерной печати хлебопекарного теста. *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*, 5, 39–42. <https://doi.org/10.33979/2219-8466-2021-70-5-39-42>
- Гришин, А. С., Бредихина, О. В., Помоз, А. С., Пономарев В. Г., & Красуля, О. Н. (2016). Новые технологии в индустрии питания — 3D-печать. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Пищевые и биотехнологии*, 4(2), 36–44. <https://doi.org/10.14529/food160205>
- Дресвянников, В. А., Страхов, Е. П., & Возмищева, А. С. (2017). Анализ применения аддитивных технологий в пищевой промышленности. *Продовольственная политика и безопасность*, 3, 133–139. <https://doi.org/10.18334/ppib.4.3.38500>
- Прибытков, А. В., Овсянников, В. Ю., Мартеха, А. Н., & Торопцев, В. В. (2015). Основные факторы, влияющие на кинетику процесса сушки ферментированного пшеничного сырья. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 5, 33–35.
- Семенов, А. С., Максимов, А. С., Бесфамильная, Е. М., & Талмазова, Д. В. (2021). Технологии 3D-печати в пищевой промышленности. *Молодой ученый*, 21, 41–43.
- Allan, M. C., Rajwa, B., & Mauer, L. J. (2018). Effects of sugars and sugar alcohols on the gelatinization temperature of wheat starch. *Food Hydrocolloids*, 84, 593–607. <https://doi.org/10.1016/j.FOODHYD.2018.06.035>
- Auger, F., Morel, M-H., Lefebvre, J., Dewilde, M., & Redl, A. A. (2008). Parametric and microstructural study of the formation of gluten network in mixed flour–water batter. *Journal of Cereal Science*, 48(2), 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.JCS.2007.10.006>
- Cappelli, A., Bettacini, L., & Cini, E. (2020). The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies. *Trends Food Science and Technology*, 104, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.008>
- Chhanwal, N., Bhushette, P. R., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Current Perspectives on Nonconventional Heating Ovens for Baking Process: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2198-y>
- Demei, K., Zhang, M., Phuhongsung, P., & Mujumdar, A. S. (2022). 3D Food printing: Controlling characteristics and improving technological effect during food processing. *Food Research International*, 156, Article 111120. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111120>
- Dessey, T., Jury, V., & Le-Bail, A. (2011). The effect of moisture content on short infrared absorptivity of bread dough. *Journal of Food Engineering*, 104(4), 571–576. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.01.019>
- Hackenberg, S., Jekle, M., & Becker, T. (2018). Mechanical wheat flour modification and its effect on protein network structure and dough rheology. *Food Chemistry*, 248, 296–303. <https://doi.org/10.1016/j.FOODCHEM.2017.12.054>
- Jiang, H., Zheng, L., Zou, Y., Tong, Z., Han, S., & Wang, S. (2019). 3D food printing: main components selection by considering rheological properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(14), 2335–2347. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1514363>
- Kim, H. W., Lee, I. J., Park, S. M., Lee, J. H., Nguyen, M. H., & Park, H. J. (2019). Effect of hydrocolloid addition on dimensional stability in post-processing of 3D printable cookie dough. *LWT – Food Science and Technology*, 101, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.019>
- Krishnaraj, P., Anukiruthika, T., Choudhary, P., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2019). 3D extrusion printing and post-processing of fibre-rich snack from indigenous composite flour. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1776–1786. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02336-5>

- Mann, J., Schiedt, B., Baumann, A., Conde-Petit, B., & Vilgis, T. A. (2014). Effect of heat treatment on wheat dough rheology and wheat protein solubility. *Food Science and Technology International*, 20(5), 341–351. <https://doi.org/10.1177/1082013213488381>
- Nowak, D., & Lewicki, P. P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5(3), 353–360. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2004.03.003>
- Perry, P., & Donald, A. (2002). The effect of sugars on the gelatinisation of starch. *Carbohydrate Polymers*, 49(2), 155–165. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(01\)00324-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00324-1)
- Severini, C., Derossi, A., & Azzolini, D. (2016). Variables affecting the printability of foods: preliminary tests on cereal-based products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38, 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.10.001>
- Severini, C., Azzolini, D., Albenzio, M., & Derossi, A. (2018). On printability, quality and nutritional properties of 3D printed cereal based snacks enriched with edible insects. *Food Research International*, 106, 666–676. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.034>
- Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., & Lin, L. (2018). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028>
- Vanin, F.M., Lucas, T., Trystram, G., & Michon, C. (2018). Bi-axial extensional viscosity in wheat flour dough during baking. *Journal of Food Engineering*, 236, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.007>
- Wagner, M.J., Lucas, T., Le Ray, D., & Trystram, G. (2007). Water transport in bread during baking. *Journal of Food Engineering*, 78(4), 1167–1173. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.029>
- Wählyby, U., & Skjöldebrand, C. (2002). Reheating characteristics of crust formed on buns, and crust formation. *Journal of Food Engineering*, 53(2), 177–184. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00154-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00154-6)
- Wang, K-Q., Luo, S-Z., Zhong, X. Y., Cai, J., Jiang, S. T., & Zheng, Z. (2017) Changes in chemical interactions and protein conformation during heat-induced wheat gluten gel formation. *Food Chemistry*, 214, 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.037>
- Yang, F., Zhang, M., Prakash, S., & Liu, Y. (2018). Physical properties of 3D printed baking dough as affected by different compositions. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.01.001>
- Zhang, L., Lou, Y., & Schutyser, M. A. I. (2018). 3D printing of cereal-based food structures containing probiotics. *Food Structure*, 18, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.10.002>

REFERENCES

- Blagoveshchenskii, I. G., Shibanov, E. D., & Zagorodnikov, K. A. (2020). Optimizatsiya 3D-pechatni na primere ispol'zovaniya shokoladnoi glazuri [Optimization of 3D print on the example of use of chocolate glaze]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], 12, 70–73. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10147>
- Bredikhin, S. A., Andreev, V. N., Martekha, A. N., & Kaverina, Yu. E. (2021v). Optimizatsiya trekhmernoi pechatni khlebopekarnogo testa [Optimization of 3D printing of bakery dough]. *Tekhnologiya i tovarovedenie innovatsionnykh pishchevykh produktov* [Technology and merchandising of innovative food products], 5, 39–42. <https://doi.org/10.53979/2219-8466-2021-70-5-39-42>
- Bredikhin, S. A., Andreev, V.N., Martekha, A.N., & Berezhovskii, Yu. M. (2021b). Korrelyatsiya reologicheskikh svoistv s kachestvom trekhmernoi pechatni shokoladnoi [Correlation of rheological properties with quality three-dimensional printed chocolate mass]. *Polzunovskii vestnik [Polzunovskij Vestnik]*, 3, 111–116. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.015>
- Bredikhin, S. A., Antipov, S. T., Andreev, V. N., & Martekha, A. N. (2021a). Vliyanie reologicheskikh kharakteristik na kachestvo 3D-pechatni pishchevykh past [Influence of rheological characteristics on the quality of 3D printing of food pastes]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 83(2), 40–47. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-2-40-47>
- Dresvyannikov, V. A., Strakhov, E. P., & Vozmishcheva, A. S. (2017). Analiz primeneniya additivnykh tekhnologii v pishchevoi promyshlennosti [Analysis of application of additive technologies in the food industry]. *Prodrovols'tvennaya politika i bezopasnost'* [Food Policy and Security], 3, 133–139. <https://doi.org/10.18334/ppib.4.3.38500>
- Grishin, A. S., Bredikhina, O. V., Pomoz, A. S., Ponomarev V. G., & Krasulya, O. N. (2016). Novye tekhnologii v industrii pitaniya – 3D-pechat' [New technologies in the food industry – 3D printing]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Pishchevye i biotekhnologii* [Bulletin of South Ural State University, Series Food and Biotechnology], 4(2), 36–44. <https://doi.org/10.14529/food160205>
- Pribytkov, A. V., Ovsyannikov, V. Yu., Martekha, A. N., & Toroptsev, V. V. (2015). Osnovnye faktory, vliyayushchie na kinetiku protsesssa sushki fermentirovannogo pshenichnogo syr'ya [Analysis of the influence of the main factors on the kinetics of the process drying of raw fermented wheat vibroboiling pour in bed]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and processing of Farm Products], 5, 33–35.
- Semenov, A. S., Maksimov, A. S., Besfamil'naya, E. M., & Talmazova, D. V. (2021). Tekhnologii 3D-pechatni v pishchevoi promyshlennosti [3D printing technologies in the food industry]. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist], 21, 41–43.
- Allan, M. C., Rajwa, B., & Mauer, L. J. (2018). Effects of sugars and sugar alcohols on the gelatinization temperature of

- wheat starch. *Food Hydrocolloids*, 84, 593–607. <https://doi.org/10.1016/j.FOODHYD.2018.06.035>
- Auger, F., Morel, M-H., Lefebvre, J., Dewilde, M., & Redl, A. A. (2008). Parametric and microstructural study of the formation of gluten network in mixed flour–water batter. *Journal of Cereal Science*, 48(2), 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.JCS.2007.10.006>
- Cappelli, A., Bettacini, L., & Cini, E. (2020). The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies. *Trends Food Science and Technology*, 104, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.008>
- Chhanwal, N., Bhushette, P. R., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Current Perspectives on Nonconventional Heating Ovens for Baking Process: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2198-y>
- Demei, K., Zhang, M., Phuhongsung, P., & Mujumdar, A. S. (2022). 3D Food printing: Controlling characteristics and improving technological effect during food processing. *Food Research International*, 156, Article 111120. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111120>
- Dessev, T., Jury, V., & Le-Bail, A. (2011). The effect of moisture content on short infrared absorptivity of bread dough. *Journal of Food Engineering*, 104(4), 571–576. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.01.019>
- Hackenberg, S., Jekle, M., & Becker, T. (2018). Mechanical wheat flour modification and its effect on protein network structure and dough rheology. *Food Chemistry*, 248, 296–303. <https://doi.org/10.1016/j.FOODCHEM.2017.12.054>
- Jiang, H., Zheng, L., Zou, Y., Tong, Z., Han, S., & Wang, S. (2019). 3D food printing: main components selection by considering rheological properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(14), 2335–2347. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1514363>
- Kim, H. W., Lee, I. J., Park, S. M., Lee, J. H., Nguyen, M. H., & Park, H. J. (2019). Effect of hydrocolloid addition on dimensional stability in post-processing of 3D printable cookie dough. *LWT – Food Science and Technology*, 101, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.019>
- Krishnaraj, P., Anukiruthika, T., Choudhary, P., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2019). 3D extrusion printing and post-processing of fibre-rich snack from indigenous composite flour. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1776–1786. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02336-5>
- Mann, J., Schiedt, B., Baumann, A., Conde-Petit, B., & Vilgis, T. A. (2014). Effect of heat treatment on wheat dough rheology and wheat protein solubility. *Food Science and Technology International*, 20(5), 341–351. <https://doi.org/10.1177/1082013213488381>
- Nowak, D., & Lewicki, P. P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5(3), 353–360. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2004.03.003>
- Perry, P., & Donald, A. (2002). The effect of sugars on the gelatinisation of starch. *Carbohydrate Polymers*, 49(2), 155–165. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(01\)00324-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00324-1)
- Severini, C., Derossi, A., & Azzollini, D. (2016). Variables affecting the printability of foods: preliminary tests on cereal-based products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38, 281–291. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2016.10.001>
- Severini, C., Azzollini, D., Albenzio, M., & Derossi, A. (2018). On printability, quality and nutritional properties of 3D printed cereal based snacks enriched with edible insects. *Food Research International*, 106, 666–676. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.034>
- Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., & Lin, L. (2018). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028>
- Vanin, F.M., Lucas, T., Trystram, G., & Michon, C. (2018). Bi-axial extensional viscosity in wheat flour dough during baking. *Journal of Food Engineering*, 236, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.007>
- Wagner, M.J., Lucas, T., Le Ray, D., & Trystram, G. (2007). Water transport in bread during baking. *Journal of Food Engineering*, 78(4), 1167–1173. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.029>
- Wählyby, U., & Skjöldebrand, C. (2002). Reheating characteristics of crust formed on buns, and crust formation. *Journal of Food Engineering*, 53(2), 177–184. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00154-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00154-6)
- Wang, K-Q., Luo, S-Z., Zhong, X. Y., Cai, J., Jiang, S. T., & Zheng, Z. (2017) Changes in chemical interactions and protein conformation during heat-induced wheat gluten gel formation. *Food Chemistry*, 214, 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.037>
- Yang, F., Zhang, M., Prakash, S., & Liu, Y. (2018). Physical properties of 3D printed baking dough as affected by different compositions. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.01.001>
- Zhang, L., Lou, Y., & Schutyser, M. A. I. (2018). 3D printing of cereal-based food structures containing probiotics. *Food Structure*, 18, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.10.002>