ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2375
https://elibrary.ru/XJCSOK

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Формирование структуры мякиша сбивного бездрожжевого хлеба при интенсивной СВЧ-конвективной выпечке

Г. О. Магомедов[1], А. А. Хвостов[1,2], А. А. Журавлев[3], М. Г. Магомедов[1], А. С. Таратухин[1], И. В. Плотникова[1,*]

[1] *Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия*

[2] *Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия*

[3] *Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Воронеж, Россия*

Поступила в редакцию: 08.11.2021
Принята после рецензирования: 12.03.2022
Принята к публикации: 05.04.2022

**И. В. Плотникова: plotnikova_2506@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5959-6652*
Г. О. Магомедов: https://orcid.org/0000-0002-7201-8387
А. А. Хвостов: https://orcid.org/0000-0002-3836-9407
А. А. Журавлев: https://orcid.org/0000-0002-2194-767X
М. Г. Магомедов: https://orcid.org/0000-0003-2494-4973
А. С. Таратухин: https://orcid.org/0000-0002-9880-9726

© Г. О. Магомедов, А. А. Хвостов, А. А. Журавлев, М. Г. Магомедов, А. С. Таратухин, И. В. Плотникова, 2022

Аннотация.
Разработка технологии сбивного бездрожжевого хлеба из муки цельносмолотого зерна пшеницы является актуальной задачей хлебопечения. Для реализации данной технологии необходимо правильно управлять процессом пенообразования сбивного бездрожжевого теста с сохранением высокопористой структуры мякиша сбивных тестовых заготовок и тонкостенной корки хлеба при выпечке. Цель работы – исследование изменения качества и установление режимов приготовления сбивного бездрожжевого теста, а также сбивных тестовых заготовок при их комбинированном СВЧ-конвективном нагреве.
В работе исследовались образцы сбивного бездрожжевого теста, полученного на смесительно-сбивально-формующей установке, и сбивные тестовые заготовки после предварительного СВЧ-нагрева со сформировавшимся мякишем мелкопористой структуры. Для оценки пористости мякиша хлеба разработали методику оптического количественного анализа структуры пузырьков воздуха.
С учетом ограничения на максимальный размер пузырьков воздуха в мякише были предварительно получены сбивные бездрожжевые тестовые заготовки плотностью 0,40 ± 0,03 г/см^3 с мелкодисперсными воздушными пузырьками. Для формирования устойчивой высокопористой структуры их предварительно подвергали СВЧ-нагреву при температуре 65 ± 1 °C в центре мякиша, а затем конвективному нагреву при температуре 99 ± 1 °C в центре мякиша для формирования тонкостенной корки хлеба. Проведенные исследования показали зависимость изменения пористости мякиша и формирования его структуры от длительности СВЧ-нагрева сбивных тестовых заготовок. Определили рациональную продолжительность предварительного СВЧ-нагрева сбивных тестовых заготовок (70–80 с) и окончательного конвективного нагрева при выпечке хлеба (до 14 мин). Использование комбинированного СВЧ-конвективного нагрева сбивных тестовых заготовок позволяет сократить процесс их выпечки на 26 мин.
Представленный подход вместе с методикой оптической оценки пузырьков воздуха позволит разработать алгоритм оптимального управления процесса комбинированной выпечки хлеба. Разработанная технология сбивного бездрожжевого хлеба является высокоперспективной для внедрения в гражданское и войсковое хлебопечение.

Ключевые слова. Хлеб, мякиш, СВЧ, выпечка, пористость, качество

Финансирование. Работа выполнена на базе Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ).

Для цитирования: Формирование структуры мякиша сбивного бездрожжевого хлеба при интенсивной СВЧ-конвективной выпечке / Г. О. Магомедов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 3. С. 426–438. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2375

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2375
https://elibrary.ru/XJCSOK

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Formation of Whipped Yeast-Free Bread Crumb with Intensive Microwave Convective Baking

Gazibeg O. Magomedov[1], Anatoly A. Khvostov[1,2], Aleksey A. Zhuravlev[3], Magomed G. Magomedov[1], Aleksei S. Taratukhin[1], Inessa V. Plotnikova[1]

[1] *Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia*

[2] *Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia*

[3] *Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Yu.A.Gagarin Air Force Academy of the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh, Russia*

Received: 08.11.2021
Revised: 12.03.2022
Accepted: 05.04.2022

**Inessa V. Plotnikova: plotnikova_2506@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5959-6652*
Gazibeg O. Magomedov: https://orcid.org/0000-0002-7201-8387
Anatoly A. Khvostov: https://orcid.org/0000-0002-3836-9407
Aleksey A. Zhuravlev: https://orcid.org/0000-0002-2194-767X
Magomed G. Magomedov: https://orcid.org/0000-0003-2494-4973
Aleksei S. Taratukhin: https://orcid.org/0000-0002-9880-9726

© G.O. Magomedov, A.A. Khvostov, A.A. Zhuravlev, M.G. Magomedov, A.S. Taratukhin, I.V. Plotnikova, 2022

Abstract.
The development of the technology of whipped yeast-free bread made from whole wheat flour is an urgent task of baking. To implement this technology, it is necessary to properly manage the foaming process of whipped yeast-free dough while preserving the highly porous structure of the crumb of whipped dough blanks and thin-walled bread crust during baking. The purpose of the work is to study the quality changes and establish the modes of preparation of churned yeast-free dough, as well as churned dough blanks with their combined microwave-convective heating.
In the work, samples of churned yeast-free dough obtained on a mixing-churning-forming plant and churned test blanks after pre-microwave heating with a finely porous crumb formed were studied. For an objective assessment of the porosity of bread crumb, a method of optical quantitative analysis of the structure of air bubbles has been developed.
It was found that, taking into account the restriction on the maximum size of air bubbles in the crumb, churned yeast-free test blanks with a density of 0.40 ± 0.03 g/cm^3 with finely dispersed air bubbles were preliminarily obtained, in order to form a stable highly porous structure, they were previously subjected to microwave heating at a temperature of 65 ± 1°C in the center of the crumb, and then convective heating at at a temperature of 99 ± 1°C in the center of the crumb to form a thin-walled crust of bread. The conducted studies have shown the dependence of changes in the porosity of the crumb, the formation of its structure on the duration of microwave heating of churned dough blanks. The rational duration of pre-microwave heating of churned dough blanks is determined – 70–80 s and final convective heating during bread baking – up to 14 min. The use of combined microwave-convective heating of churned dough blanks reduces the baking process by 26 min.
The presented approach, together with the method of optical evaluation of air bubbles, allows us to develop an algorithm for optimal control of the process of combined baking bread. The accelerated technology of churned yeast-free bread has been developed and is highly promising for widespread implementation in civil and military bakery.

Keywords. Bread, crumb, microwave, baking, porosity, quality

Funding. The research was performed on the premises of the Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET).

For citation: Magomedov GO, Khvostov AA, Zhuravlev AA, Magomedov MG, Taratukhin AS, Plotnikova IV. Formation of Whipped Yeast-Free Bread Crumb with Intensive Microwave Convective Baking. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(3):426–438. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2375

Введение

Приоритетной задачей хлебопекарной отрасли является обеспечение населения хлебобулочными изделиями в достаточном ассортименте и объеме для формирования профилактического и сбалансированного питания [1–3]. Специалисты в области здорового питания отдают предпочтение хлебу из муки цельносмолотого зерна пшеницы, который богат пищевыми волокнами, макро- и микроэлементами, а также витаминами. Такой хлеб получен по технологии сбивных бездрожжевых хлебобулочных изделий повышенной пищевой ценности и низкого ценового сегмента [4].

Процесс выпечки хлебобулочных изделий традиционными способами сопряжен с энергозатратами, длительностью технологического процесса, металлоемкостью оборудования и большими производственными площадями [5]. Исследование эффективных альтернативных источников подвода энергии к тестовой заготовке для сокращения продолжительности и упрощения процесса выпечки хлебобулочных изделий является актуальной задачей, особенно для технологии приготовления сбивного бездрожжевого хлеба, где процесс приготовления сбивного теста осуществляется в течение 1–2 мин, а выпечка – до 40 мин.

С точки зрения механизма подвода или генерации тепла, вызывающего прогрев выпекаемой тестовой заготовки, существующие способы выпечки можно классифицировать следующим образом:

– тепло к выпекаемой тестовой заготовке подводится извне (радиационно-конвективный способ в традиционных хлебопекарных печах; в печах с генераторами инфракрасного излучения; в замкнутых камерах в атмосфере пара (в атмосфере насыщенного пара или в атмосфере насыщенного пара в начале выпечки и в атмосфере перегретого пара в конце));
– тепло выделяется в массе прогретой тестовой заготовки (с применением электроконтактного прогрева; в электрическом поле токов высокой и сверхвысокой частоты (СВЧ); с применением инфракрасного прогрева);
– выпечка с комбинированным прогревом тестовой заготовки (с одновременным высокочастотным и инфракрасным прогревом; с прогревом в электрическом поле токов высокой частоты в начале выпечки и с инфракрасным прогревом при завершении; с одновременным инфракрасным и электроконтактным прогревом; с последовательным электроконтактным и инфракрасным прогревом; с одновременным прогревом инфракрасным излучением с наложением ультразвука в пекарной камере) [6–11].

Применение разных механизмов подвода тепла открывает новые возможности по интенсификации процесса выпечки хлебобулочных изделий. Анализ известных способов подвода тепла к тестовым заготовкам с позиции упрощения и сокращения продолжительности выпечки показал, что перспективным является комбинированный радиационно-конвективный способ – сверхвысокочастотный конвективный нагрев. Другие способы подвода тепла приводят к увеличению энергоемкости, продолжительности выпечки и усложнению конструкции хлебопекарных печей [12]. Формирование высоких показателей качества хлебобулочных изделий (вкус, запах, цвет, структура корки и мякиша) происходит путем оптимального сочетания интенсивности и продолжительности воздействия комбинирующих режимов выпечки в одном технологическом цикле.

Ввиду равномерности прогрева по объему тестовой заготовки и экономичности процесса выпечки (экономия энергии до 40 %) основной подвод тепла в массе тестовой заготовки следует осуществлять за счет сверхвысокочастотной энергии до формирования устойчивой мелкопористой упруго-эластичной структуры мякиша хлебобулочных изделий [13]. Должен завершиться процесс денатурации белка и клейстеризации крахмала, а также перераспределения влаги между ними с повышением доли связанной влаги. Это придает устойчивость пенным пленкам воздушных пузырьков мякиша хлеба [14].

Для формирования корки с золотисто-кремовым цветом и привлекательным товарным видом, а также с сохранением влаги внутри мякиша необходим конвективный или дополнительно инфракрасный нагрев, который подводит тепло внутрь тестовой заготовки за счет теплопроводности тестового скелета. Процесс нагрева дополнительно интенсифицируется. Это может привести к неравномерному перегреву и разрушению мелкопористой структуры мякиша за счет разрыва пенных пленок воздушных пузырьков [15].

При дополнительном введении инфракрасных излучателей в хлебопекарную печь с СВЧ-нагревом усложняется ее конструкция и повышаются энергозатраты, а также ограничивается глубина проникновения коротковолновых лучей инфракрасных излучателей в тестовые заготовки [16–18]. В связи с этим необходим баланс между быстрым нагревом, формированием структуры мякиша и корки хлебобулочных изделий. Следовательно, для ускоренной выпечки сбивных тестовых заготовок эффективно применение комбинированного сверхвысокочастотного и конвективного режима прогрева за счет простоты конструкции печи и энергоэкономичности [19].

Наибольший вклад в ускорение процесса выпечки тестовых заготовок и формирование мелкопористой упруго-эластичной структуры мякиша вносит сверхвысокочастотный нагрев. Интерес представляет зависимость пористости и распределения пузырьков воздуха по размерам от технологических параметров

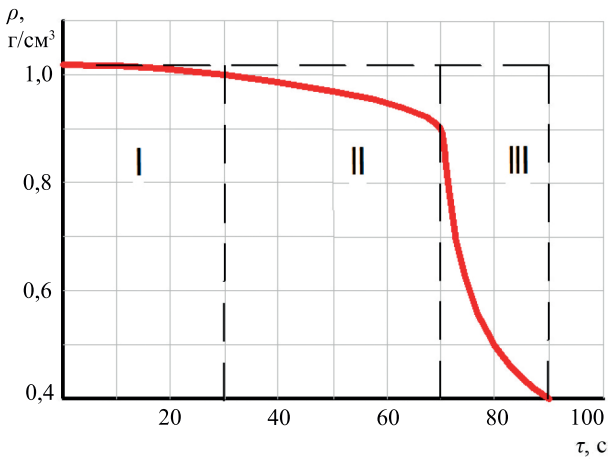


Рисунок 1. Изменение объемной массы теста от продолжительности его замеса (I), сбивания (II) и при сбросе избыточного давления (III) в сбивальной камере

Figure 1. Effect of kneading time (I), whipping (II), and pressure release (III) on dough volume

процесса при СВЧ-нагреве сбивных тестовых заготовок из муки цельносмолотого зерна пшеницы. Это дает возможность управлять процессом выпечки с целью обеспечения заданной текстуры бездрожжевого хлеба и сокращения его продолжительности [20–22].

Цель работы – исследование изменения качества и установление режимов приготовления сбивного бездрожжевого теста, а также сбивных тестовых заготовок при их предварительном СВЧ-нагреве и последующем конвективном нагреве с формированием мелкопористой структуры мякиша и тонкостенной корки сбивного бездрожжевого хлеба из муки цельносмолотого зерна пшеницы.

Объекты и методы исследования

Образцы сбивных тестовых заготовок влажностью 56 ± 1 % из муки цельносмолотого зерна пшеницы готовили в несколько этапов. На первом этапе в смесительно-сбивально-формующую установку вносили концентрированный яблочный сок, поваренную пищевую соль, воду и муку из цельносмолотого зерна пшеницы. Полученную смесь предварительно перемешивали в течение 20 с при частоте вращения венчиковой мешалки 1,7 $с^{-1}$. Далее полученную массу интенсивно сбивали при частоте вращения венчиковой мешалки 16 $с^{-1}$ в течение 40 с, а затем при избыточном давлении воздуха 5 атм в течение 20 с. По завершении процесса сбивания тесто формовали под давлением в силиконовые формы массой по 580 г, после чего сбрасывали избыточное давление воздуха до нуля. В результате этого тестовые заготовки увеличивались в объеме в 3 раза до объемной массы 0,40 ± 0,03 г/$см^3$. Изменение объемной массы теста (ρ, г/$см^3$) от продолжительности его замеса (I), сбивания (II) и при сбросе избыточного давления (III) в сбивальной камере представлено на рисунке 1. Фотосъемка образцов осуществлялась с помощью цифровой камеры Canon EOS 400D при освещении люминесцентной лампой мощностью 40 Вт с цветовой температурой 4000 К.

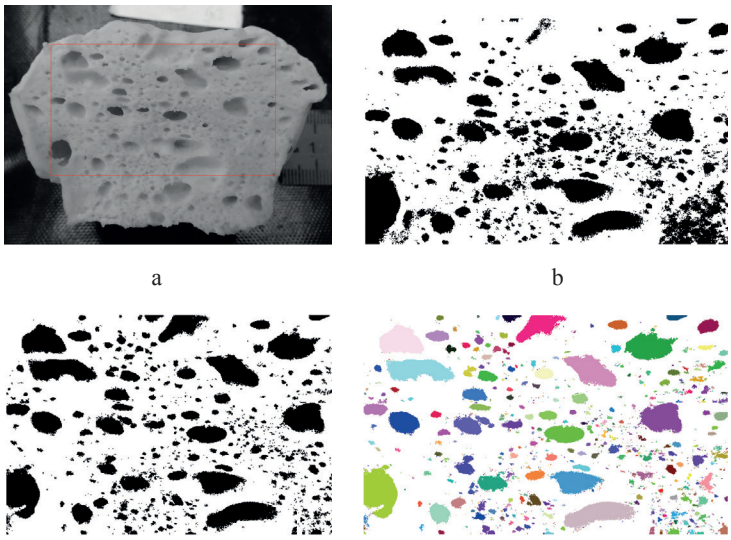
Тестовые заготовки в силиконовых формах помещали в микроволновую печь марки Panasonic NN-CSS 965. Температуру сбивного теста контролировали при помощи термопары ОВЕН ДТПL054 и регистратора ТРМ-200 в центре мякиша в процессе нагрева. Окончание процесса выпечки фиксировали по достижении температуры в центре мякиша 98 ± 1 °С.

Для комбинированной СВЧ-конвективной выпечки сбивные тестовые заготовки предварительно нагревали до температуры 65 ± 1 °С в центре мякиша. Затем отключали СВЧ-нагрев и выпекали в печи кондитерской с электрообогревом PFS-9E в течение 720 с до достижения температуры в центре мякиша 98 ± 1 °С. Для сравнительного исследования были получены образцы бездрожжевых сбивных тестовых заготовок из муки цельносмолотого зерна пшеницы с различной длительностью этапа СВЧ-нагрева: 60, 90 и 120 с при удельной мощности нагрева 2,9 Вт/г и температуре от 65 ± 1 до 98 ± 1 °С.

Для оценки пористости мякиша сбивного бездрожжевого хлеба из муки цельносмолотого зерна пшеницы, полученного при СВЧ-нагреве сбивных тестовых заготовок, разработана методика оптического количественного анализа структуры образовавшихся пузырьков воздуха. На рисунке 2 в качестве примера представлены фотографии, на которых изображены срез мякиша выпеченного хлеба при СВЧ-нагреве сбивных тестовых заготовок в течение 60 с (a), некорректное разделение пузырьков воздуха и теста по порогу интенсивности (b), корректное разделение пузырьков воздуха и теста с помощью радиальной нейронной сети (c) и результаты разбиения изображения на кластеры (d).

При масштабировании и обрезке исходных фотографий до размера 1600×1200 пикселей вся серия фотографий была приведена к одному масштабу с помощью попадающего в кадр эталона линейного размера (стальная линейка) (рис. 2a). Размер одного пикселя 0,05634 мм. Это позволило обнаружить пузырьки воздуха размером не менее 0,06 мм.

Так как пузырьки в мякише сбивного бездрожжевого хлеба не имеют цветовой дифференциации, то изображение преобразовывалось из цветного режима в режим градации серого цвета. При этом производилось усреднение яркости трех цветовых каналов I^{R}_{ij}, I^{G}_{ij}, I^{B}_{ij} (красного, зеленого, синего) (рис. 2b):



a b c d

Рисунок 2. Результаты обработки фотоснимков

Figure 2. Processed photos

$$I_{ij} = (I^{R}_{ij} + I^{G}_{ij} + I^{B}_{ij}) / 3 \quad (1)$$

где i, j – индекс элемента массива пикселей изображения.

Усреднение яркости трех каналов позволило повысить точность передачи необходимой для дальнейшего анализа общей яркости I_{ij} по сравнению с использованием какого-то одного из каналов. Для желтоватой поверхности среза мякиша сбивного хлеба можно было использовать синий канал I^{B}_{ij} как диаметрально противоположный на цветовом круге.

Для определения пузырьков воздуха мякиша изображение преобразовывалось в черно-белое (рис. 2b). Использование простого способа разделения изображения на черные и белые области – по пороговой яркости $I_п$ (пиксели изображения с яркостью $I_{ij} < I_п$ считаются «черными», пиксели с яркостью $I_{ij} \geq I_п$ считаются «белыми») – приводит к ошибкам определения пузырьков из-за неоднородного освещения образца (рис. 2b). Например, из-за избытка освещения в левом верхнем углу изображения крупные пузырьки оказываются заниженных размеров, а мелкие пузырьки практически не проявляются. Из-за недостатка освещения в правом нижнем углу, наоборот, мелкие пузырьки сливаются в одну большую черную область.

Для решения проблемы неоднородного освещения пороговая интенсивность $I_п$ разделения на «черное» и «белое» представлена как плавная функция от положения на изображении $I_п(i, j)$. В этом случае разделение на «черные» и «белые» пиксели производится по формуле

$$M_{ij} = \begin{cases} 1, & I_{ij} < I_п(i,j) \\ 0, & I_{ij} \geq I_п(i,j) \end{cases} \quad (2)$$

где M_{ij} – матрица принадлежности области пространства ij к пузырькам.

Для задания плавной функции пороговой интенсивности I_{ij} использовалось разбиение изображения на 25 прямоугольных областей (5 по горизонтали, 5 по вертикали). Расчет средней интенсивности в каждой прямоугольной области проводился по формуле (3) [23]:

$$I_п(i,j) = \frac{\sum_{m=1}^{5}\sum_{n=1}^{5} I_{cmn} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\sigma^2}\sum_{m=1}^{5}\sum_{n=1}^{5}\left(\left(i - \frac{m-\frac{1}{2}}{5} i_m\right)^2 + \left(j - \frac{n-\frac{1}{2}}{5} j_m\right)^2\right)\right)}{\sum_{m=1}^{5}\sum_{n=1}^{5} \exp\left(-\frac{1}{\sigma^2}\sum_{m=1}^{5}\sum_{n=1}^{5}\left(\left(i - \frac{m-\frac{1}{2}}{5} i_m\right)^2 + \left(j - \frac{n-\frac{1}{2}}{5} j_m\right)^2\right)\right)} \quad (3)$$

где m и n – горизонтальный и вертикальный индексы разбиения изображения на 25 прямоугольных областей; I_{cmn} – средняя интенсивность в прямоугольной области (m, n); σ – расстояние усреднения (использовалось значение 150 пикселей для изображения размером 1600×1200); i_m, j_m – максимальные значения i и j (размер изображения).

При использовании разделения на черные и белые области матрица принадлежности к пузырькам является более однородной (рис. 2c). Визуальная оценка свидетельствует о хорошем соответствии черных и белых областей пузырькам исходного изображения. В этом случае в засвеченном левом верхнем углу проявляется множество мелких пузырьков, а большие пузырьки имеют увеличенный размер. В затемненном правом нижнем углу множество мелких пузырьков не сливаются в одну область, а четко отделены друг от друга.

На следующем этапе фотограмметрического анализа необходимо распознать отдельные пузырьки. Для этого по матрице принадлежности пузырькам M_{ij} выделялись кластеры: протяженные области пространства M_{ij}, в которых заполненные элементы «1» находятся в соседстве друг с другом [23]. Кластеры нумеруются и им присваиваются номера $C_{ij} = k$. Это позволило рассматривать каждую связную область как отдельный газовый пузырек и определять его параметры (рис. 2d).

Алгоритм реализован в среде программирования Borland Delphi 7. Машинное время поиска кластеров на изображении размером 1600×1200 пикселей составило около 15 с. Визуальное сравнение исходной фотографии и картограммы распределения кластеров позволило сделать вывод о том, что распознаны видимые глазом пузырьки. Их форма и площадь передаются корректно, а пузырьки-кластеры отделены друг от друга.

Из-за сложного рельефа поверхности среза вблизи каждого пузырька формируется область отражения света, которая вносит систематическую погрешность измерения площади пузырьков. Для коррекции этой погрешности производится калибровка путем сравнения площадей пузырьков, которые измерили методами фотограмметрии и графоаналитики с участием 3-х человек (сотрудники кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств ВГУИТ и АО «Хлебзавод № 7», Воронеж). Сравнение производилось для 20 пузырьков различного размера (от 1 до 10 мм). На основе усреднения определялся средний коэффициент увеличения площади. Для приведенного примера коэффициент увеличения площади составил 1,31. Однако при фотограмметрии срезов различных образцов из-за отличий условий освещения коэффициент различался (около 7 %).

Ограничением разработанного метода является неполное определение пузырьков большого размера (более 10 мм), т. к. из-за большого диаметра на фотографии получается сложное сферическое распределение интенсивности. Поэтому поиск всего пузырька является сложной задачей распознавания. Пузырьки размером более 10 мм относятся к дефектам хлеба. Поэтому точная их форма и размеры не представляют интереса в данном исследовании: достаточно знать, что размер пузырька более 10 мм.

Для дальнейшего исследования рассчитывается площадь найденных пузырьков S_k как площадь соответствующих кластеров k:

$$S_k = \sum_{i=1}^{i_m} \sum_{j=1}^{j_m} \begin{cases} 1, & C_{ij} = k \\ 0, & C_{ij} \neq k \end{cases} \tag{4}$$

Для определения эффективного диаметра пузырька R_k использовали формулу площади круга при допущении, что форма пузырька – сфера и его сечение ведется по диаметральной плоскости:

$$R_k = \sqrt{\frac{S_k}{\pi}} \tag{5}$$

Для статистическо-геометрического анализа пузырьков в хлебе использованы функции распределения пузырьков по размерам $N_п(R_п)/S$ и площадям $N_п(S_п)/S$ и функции распределения относительной площади пузырьков по размерам $S_п/S(S_п)$ и их площадям. $N_п/S$ – количество пузырьков на единице площади; $R_п$ – размер пузырька; $S_п$ – площадь пузырька; $S_п/S$ – доля площади пузырьков данного типа в общей площади пузырьков. Перечисленные функции определяются сходным образом. Функция $N_п(R_п)/S$ определяется по найденному кластерному разбиению следующим образом:

$$N_п(R_п)/S = \frac{1}{i_m j_m q^2} \sum_{k=1}^{N_к} \begin{cases} 1, & R_п - d < R_k \leq R_п + d \\ 0, & \left[\begin{array}{l} R_k \leq R_п - d \\ R_k > R_п + d \end{array} \right. \end{cases} \tag{6}$$

где q – коэффициент масштаба (размер пикселя в миллиметрах или в других единицах измерения линейного размера); k – номер пузырька; $N_к$ – количество пузырьков (кластеров); d – шаг дискретизации шкалы размеров пузырька $R_п$ для построения таблично заданной функции $N_п(R_п)/S$.

Так как пузырьковая структура мякиша сбивного бездрожжевого хлеба является выраженной мультимасштабной структурой, то при анализе перечисленных распределений целесообразно использовать логарифмическую шкалу как для размеров $R_п$ (изменяется в данном исследовании более чем на два порядка: от 0,06 до 10 мм) и площадей сечения $S_п$ пузырьков, так и для относительного количества пузырьков $N_п/S$ и относительной площади, занятой пузырьками данного размера $S_п/S$.

Для дальнейшего анализа интерес представляет исследование поведения отдельных фракций пузырьков, которые определяют механические

свойства пористой матрицы тестовой заготовки в процессе выпечки. Проведенные исследования для рассмотренной рецептуры показали, что из-за более низкой вязкости сбивного теста, по сравнению с традиционными дрожжевыми (56 % влажности для сбивного против 43 % для дрожжевого), устойчивость пенной структуры увеличивается с повышением дисперсности воздушных пузырьков и сохраняется при их размерах, не превышающих в диаметре 4,5 мм. По этим причинам пузырьки, размеры которых превышают 10 мм, являются дефектами в мякише сбивных хлебобулочных изделий.

Результаты и их обсуждение

В результате обработки экспериментальных данных 4-х образцов, выпекаемых при одних и тех же условиях, получены две зависимости: для общей пористости (сплошная линия, рис. 3) и пористости в пузырьках, размер которых не превышает 4,5 мм, что соответствует площади сечения пузырьков 16 мм^2. Площадь поверхности пузырьков ($S_{пов}$) составляет 64 мм^2 в приближении сферической формы пузырька (штрихпунктирная линия, рис. 3).

Для получения плавной аналитической зависимости $S_п/S_с(t_{свч})$ использовалась аппроксимация полиномом второго порядка методом наименьших квадратов. Для общей пористости получено выражение

$$S_п/S_с(t_{свч}) = -0{,}00611\ t_{свч}^{\ 2} + 1{,}18\ t_{свч} + 7{,}00; \qquad (7)$$

для пор площадью не более 16 мм^2 на срезе получено выражение

$$S_п/S_с(t_{свч}) = 0{,}00189\ t_{свч}^{\ 2} - 0{,}39\ t_{свч} + 72{,}6, \qquad (8)$$

где $S_п/S_с$ – безразмерная величина; $t_{свч}$ измеряется в секундах.

Максимум функции общей пористости, найденный по формуле (7), достигается при длительности этапа СВЧ-нагрева около 96,6 с. Если целью является получение максимальной пористости хлеба без учета размера газовых пузырьков, то оптимальной длительностью этапа СВЧ-нагрева является 96,6 с. Пористость мякиша хлеба составляет 64 %. Если целью является не только максимизация пористости мякиша хлеба, но и условие не превышения пузырьками размера 4,5 мм (площади 16 мм^2), то оптимальная длительность этапа СВЧ-нагрева составляет около 60 с. Все поры имеют площадь менее 16 мм^2, а $S_{пов}$ – менее 64 мм^2.

Помимо такой интегральной характеристики, как пористость, разработанный фотограмметрический метод позволяет получить более детальные характеристики системы газовых пузырьков. Изучены два типа функций распределения пузырьков по площадям. Первая функция $N\ (S_п)/S_с$ представляет собой количество N пузырьков в единице площади, имеющих площадь $S_п$. Данная функция определяется по кластерному разбиению изображения следующим образом.

$$N(S_п)/S_c = \frac{1}{i_m j_m q^2}\sum_{k=1}^{N_к}\begin{cases}1, & S_п - d < S_k \le S_п + d\\ 0, & \left[\begin{array}{l} S_k \le S_п - d \\ S_k > S_п + d\end{array}\right.\end{cases} \qquad (9)$$

где i_m, j_m – размер изображения по горизонтали и вертикали; q – коэффициент масштаба (размер пикселя в миллиметрах или в других единицах измерения линейного размера); k – номер пузырька; $N_к$ – количество пузырьков (кластеров); d – шаг дискретизации шкалы размеров пузырька $S_п$ для построения таблично заданной функции $N_п(S_п)/S_с$.

Функции распределения пузырьков по площадям имеют немонотонный убывающий характер: наибольшее количество пузырьков малой площади 0,01–0,03 мм^2 и очень малое количество больших пузырьков более 2 мм^2 (рис. 4). При длительности этапа СВЧ-нагрева 60 с площадь сечения пузырьков не превышает 4 мм^2 (рис. 4a). С повышением длительности $t_{свч}$ увеличивается максимальная площадь сечения пузырька: при 90 с максимальная площадь составляет 64 мм^2 (рис. 4b), при 120 с – 128 мм^2 (рис. 4c). Здесь и далее кратность результатов 2 обусловлена используемой логарифмической шкалой и множителем 2 между границами интервалов усреднения гистограммы.

Более выраженный геометрический смысл имеет другая функция $S_{пΣ}(S_п)/S_с$: отношение суммарной площади сечения $S_{пΣ}$ пузырьков данного размера $S_п$ к площади среза $S_с$. Для определения данной функции использовалась формула, аналогичная (3).

Наличие пика на функции $S_{пΣ}(S_п)/S_с$ при некотором значении $S_п$ означает, что большинство пузырьков имеет такую площадь $S_п$. При $t_{свч}$ = 60 с

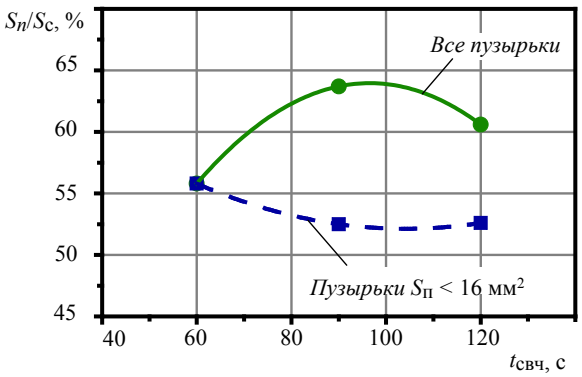


Рисунок 3. Зависимость пористости сбивного бездрожжевого хлеба $S_п/S_с$ от длительности этапа СВЧ-нагрева ($t_{свч}$)

Figure 3. Effect of microwave heating time ($t_{свч}$) on porosity ($S_п/S_с$)

большинство пузырьков имеет площадь поперечного сечения около 1,5 мм^2 ($S_{пов}$ составляет около 6,0 мм^2) (рис. 4d). При большей длительности $t_{свч}$ распределение расширяется и не сводится к одному выраженному пику (рис. 4e и f).

Можно предположить, что сложный характер функции распределения $S_{п\Sigma}(S_п)/S_с$ получается в результате наложения нескольких мод, по форме близких к плотности нормальной функции распределения. В рамках этого предположения

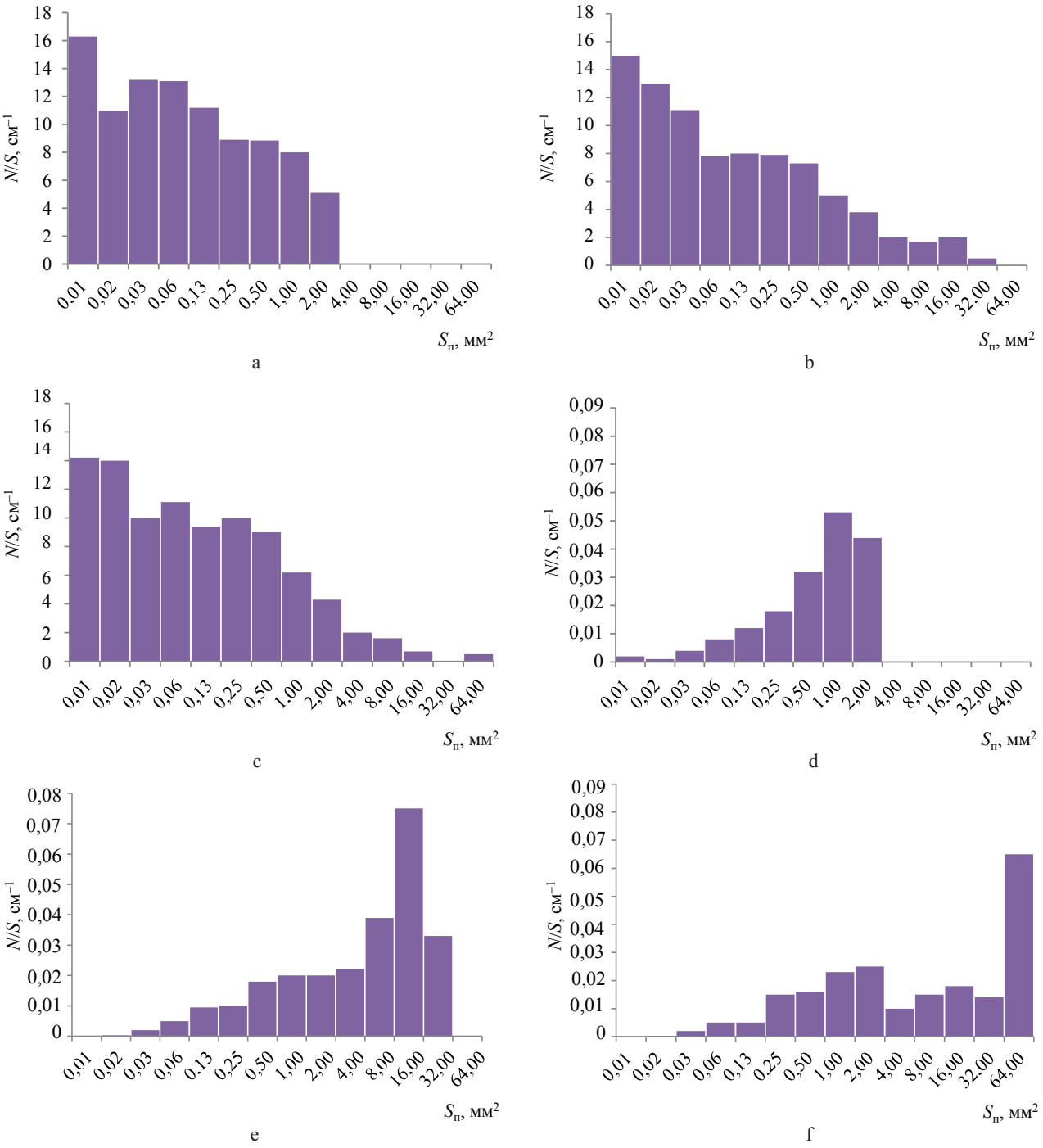


Рисунок 4. Распределение $N(S_п)$, $S_{п\Sigma}(S_п)/S_с$ пузырьков по площадям для разной длительности этапа СВЧ-нагрева (a, d – 60 с; b, e – 90 с; c, f – 120 с)

Figure 4. Distribution of bubbles ($N(S_п)$, $S_{п\Sigma}(S_п)/S_с$) by area for different microwave heating time (a, d – 60 s; b, e – 90 s; c, f – 120 s)

была проведена аппроксимация функций $S_{п\Sigma}(S_п)/S_с$ взвешенной суммой плотностей нескольких нормальных распределений: одним для $t_{свч}$ = 60 с (рис. 5a), двумя для $t_{свч}$ = 90 с (рис. 5b), тремя для $t_{свч}$ = 120 с (рис. 5c). Каждый пик задавался функцией плотности распределения с тремя параметрами:

$$S_{п\Sigma}(S_п)/S_c = S_{пм}/S_c \exp\left(-\frac{(S_п - S_{пп})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

для модального распределения

$$\frac{S_{п\Sigma}(S_п)}{S_с} = \sum_m^M \alpha_m \frac{S_{пм}}{S_с} e^{\left(-\frac{(S_п - S_{ппm})^2}{2\sigma_m^2}\right)} \quad (11)$$

где $S_{пм}/S_с$ – максимум нормального распределения; $S_{пп}$ – математическое ожидание (средний размер пузырьков); σ – дисперсия (характеристика ширины моды), α_m – весовой коэффициент m-ой моды. Результаты аппроксимации функции $S_{п\Sigma}(S_п)/S_с$ приведены в таблице 1, где представлены значения $S_{пов}$ для соответствующих значений $S_{пп}$.

Характер изменения структуры функции распределения пузырьков воздуха в ходе выпечки (появление новых мод) объясняется протеканием физико-химических процессов в сбивных тестовых заготовках в процессе выпечки. На начальном этапе происходит образование пузырьков воздуха, вызванное процессом взбивания теста под давлением, где происходит образование газовой фазы за счет механического разрыхления. В ходе этого процесса образуются пузырьки размера, не поддающегося оптической идентификации без использования соответствующего увеличения. Далее начинается рост их объема, вызванный процессом фазового перехода «вода – пар» и соответствующего повышения давления внутри образованных ранее пор. Как видно из рисунка 4d, распределение имеет одну моду. Это объясняется сохраняющейся на начальном этапе прогрева изоляцией пор друг от друга. Дальнейшее повышение давления, вызванное доминированием процессов испарения над процессами конденсации на разделяющих поры стенках, приводит к их частичному разрыву, слиянию и образованию пузырьков большего размера. Поскольку скорость этого процесса выше динамики изменения давления, то это приводит к появлению новой моды на распределении, соответствующей пузырькам бóльшего размера (рис. 4e). Параллельно с этим процессом происходит формирование проницаемой пористой матрицы и развитие процессов массопереноса паровой фазы за пределы заготовки под действием разницы парциальных давлений паров воды внутри пор и за пределами тестовой заготовки. При достижении определенной доли пузырьков бóльшего размера часть их сливается, формируя пузырьки, отличающиеся по размеру от исходных. Это приводит к выделению в распределении еще одной моды (рис. 4f). Затем процессы слияния прекращаются, т. к. происходит формирование прочной пористой матрицы из-за процессов денатурации белков и клейстеризации крахмала.

Для длительности этапа СВЧ-нагрева 60 с средняя площадь пузырька составила 1,95 мм^2. Аппроксимирующая функция имеет один экстремум.

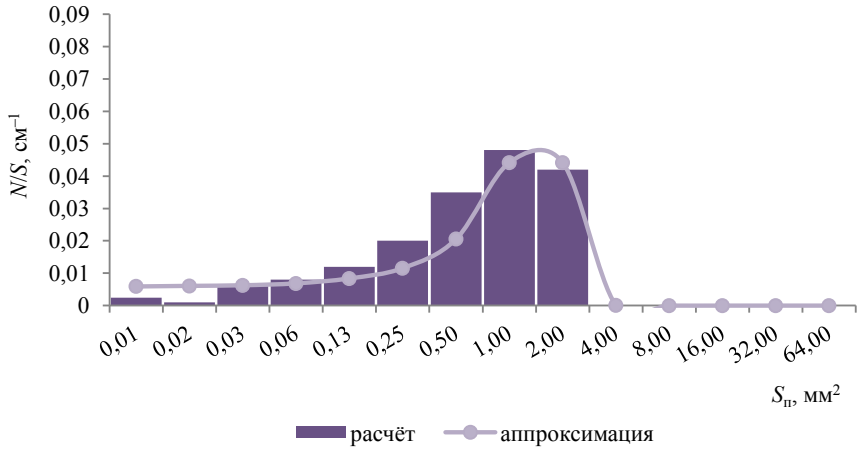
Для длительности этапа СВЧ-нагрева 90 с оказалась эффективной аппроксимация взвешенной суммой двух аппроксимирующих функций. На рисунке 5b приведены как две отдельные аппроксимирующие каждую моду функции (тонкие линии), так и их суперпозиция (толстая линия), которая по форме близка к полученной экспериментально функции распределения. Выявлено, что при длительности этапа СВЧ-нагрева 90 с формируются два типа пузырьков: пузырьки малой площади 2,02 мм^2 и пузырьки большой площади 27,58 мм^2.

При длительности этапа СВЧ-нагрева 120 с образуются еще три типа пузырьков (рис. 5c): малой (2,14 мм^2), средней (17,54 мм^2) и большой (90,50 мм^2) площадей. В данном случае проведена аппроксимация двух мод с меньшей площадью пузырьков, а для последней моды было недостаточно данных для аппроксимации (одна точка функции при минимальном количестве – три точки). Поэтому оценка положения и высоты пика производилась в приближении функции прямоугольной формы.

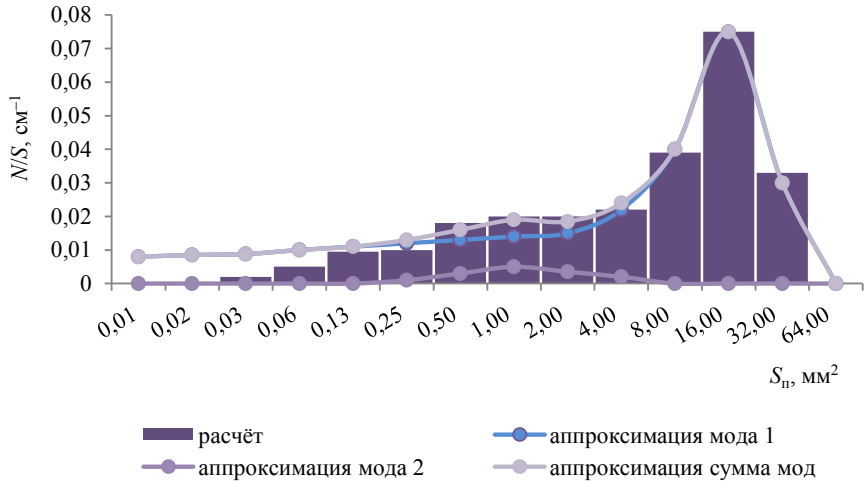
Влияние длительности этапа СВЧ-нагрева на типы пузырьков и их площадь можно проиллюстрировать диаграммой, представленной на рисунке 6.

Независимо от длительности этапа СВЧ-нагрева, образуются пузырьки площадью около 2 мм^2. Их вклад в пористость наибольший ($S_{пм}/S_с$ = 0,06) при $t_{свч}$ = 60 с, но снижается ($S_{пм}/S_с$ = 0,012 и 0,031) при большей длительности $t_{свч}$. При длительности 90–120 с формируется второй тип пузырьков площадью 15–30 мм^2. Его вклад в общую пористость также снижается с увеличением длительности $t_{свч}$. При длительности 120 с, помимо первых двух типов, формируется третий с площадью 100 мм^2. Таким образом, с увеличением длительности этапа СВЧ-нагрева увеличивается не только количество пузырьков, но и количество типов пузырьков (малые – малые, средние – малые, средние и большие).

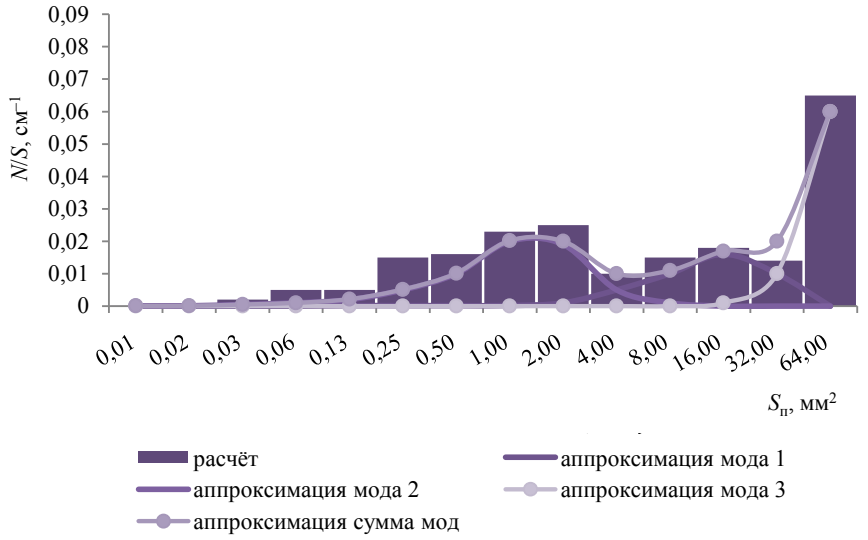
Изучено влияние продолжительности и интенсивности СВЧ-нагрева сбивных тестовых заготовок на формирование равномерной тонкодисперсной пористой структуры мякиша сбивного бездрожжевого хлеба из муки цельносмолотого зерна пшеницы. Определены статистическо-геометрические характеристики воздушных пузырьков мякиша хлеба. Учитывая ограничение на количество пузырьков второго и третьего типов, максимум длительности этапа СВЧ-выпечки должен составлять



a



b



c

Рисунок 5. Результаты аппроксимации функции $S_{п\Sigma}/S(S_п)$ одной или сдвоенной гауссовой функцией для разной длительности этапа СВЧ-нагрева: a – 60 с; b – 90 с; c – 120 с

Figure 5. Approximating function $S_{п\Sigma}/S(S_п)$ by one or double Gaussian function for different microwave heating time: a – 60 s; b – 90 s; c – 120 s

Таблица 1. Результаты аппроксимации пиков функции распределения площадей пузырьков

Table 1. Approximation of the peaks of the bubble area distribution function

$t_{свч}$, с	Номер пика	$S_{пп}$, мм^2	σ, мм^2	$S_{пм}/S_с$
60	1	1,62	0,78	0,048
90	1	2,10	0,62	0,016
	2	26,80	8,50	0,076
120	1	2,40	0,65	0,022
	2	21,30	6,20	0,027
	3	84,18	0,12	0,062

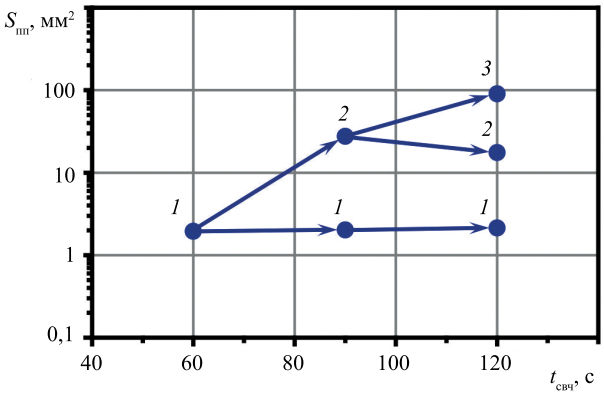


Рисунок 6. Влияние длительности этапа СВЧ-нагрева ($t_{свч}$) на количество типов пузырьков (1, 2, 3) и характерную площадь пузырьков каждого типа $S_{пп}$

Figure 6. Effect of microwave heating time ($t_{свч}$) on the number of bubble types (1, 2, 3) and bubble area for each type ($S_{пп}$)

около 60 с при удельной мощности нагрева 2,9 Вт/г. При такой длительности предварительного воздействия СВЧ-нагрева на сбивные тестовые заготовки формируется высокая пористость мякиша хлеба (63–65 %) с пузырьками первого типа малой площади поперечного сечения порядка около 2 мм^2. Пузырьки второго и третьего типов с площадями 15–30 и 100 мм^2 формируют неблагоприятные пустоты и крупнопористую структуру в мякише хлеба.

Учитывая ограничение на количество пузырьков второго и третьего типов, максимум длительности этапа СВЧ-нагрева составляет около 75–80 с. Под воздействием интенсивного СВЧ-подвода тепла в течение 75–80 с в центре мякиша достигается температура 65 ± 1 °С. В результате формируется однородная мелкопористая пенная структура мякиша. При дальнейшем интенсивном СВЧ-нагреве в течение 120 с температура в центре мякиша достигается 98 ± 1 °С. Происходит разрушение мелкопористой и формирование грубодисперсной структуры мякиша хлеба. Для сохранения мелкопористой однородной структуры мякиша

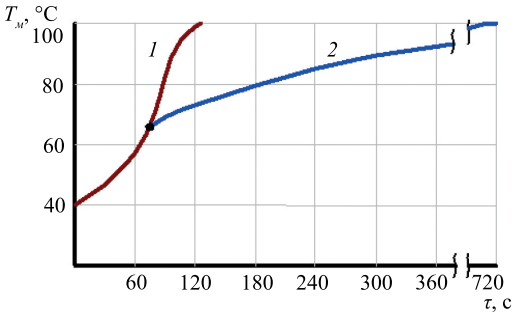


Рисунок 7. Зависимость температуры в центре мякиша от продолжительности нагрева: 1 – СВЧ; 2 – СВЧ-конвективный

Figure 7. Effect of heating time on crumb center temperature: 1 – microwave; 2 – microwave-convective

хлеба при выпечке была исследована возможность применения комбинированного СВЧ-конвективного нагрева тестовых заготовок и определение его рациональных режимов. Осуществляли предварительный СВЧ-нагрев тестовых заготовок до достижения температуры в центре мякиша 65 ± 1 °С. Затем продолжали конвективный нагрев при температуре в рабочей камере печи 260 °С в течение 720 с до достижения температуры в центре мякиша хлеба 98 ± 1 °С (рис. 7).

Установлено, что комбинированный СВЧ-конвективный способ нагрева тестовых заготовок позволяет сохранить мелкопористую однородную структуру мякиша хлеба. Это достигается из-за того, что при температуре 65 ± 1 °С в центре мякиша тестовых заготовок происходит полная денатурация, клейстеризация крахмала и фиксация устойчивой мелкопористой структуры мякиша тестовых заготовок из-за повышения прочности белковых пенных пленок воздушных пузырьков и упрочнения межпузырькового пространства при клейстеризации крахмала, а также при переводе интенсивного СВЧ-нагрева тестовых заготовок на менее интенсивный конвективный нагрев. Сохраняется мелкопористая однородная структура мякиша и формируется тонкостенная корочка хлеба.

Выводы

Определена рациональная продолжительность предварительного СВЧ-нагрева сбивных тестовых заготовок (70–80 с) и окончательного конвективного нагрева при выпечке хлеба (до 14 мин). Использование предварительного СВЧ-нагрева с формированием мелкопористой однородной структуры мякиша сбивных тестовых заготовок и последующим их допеканием конвективным способом до образования тонкостенной корочки хлеба позволяет сократить процесс выпечки на 26 мин:

с 20–40 (при конвективном способе выпечки хлеба по известному способу) до 14 мин (по разработанному способу получения сбивного бездрожжевого хлеба).

Представленный подход вместе с методикой оптической оценки пузырьков воздуха позволит разработать алгоритм оптимального управления процессом комбинированной выпечки хлеба. Разработанная технология сбивного бездрожжевого хлеба является высокоперспективной и рекомендуется для внедрения в гражданское и войсковое хлебопечение.

Критерии авторства

Г. О. Магомедов – разработал концепцию исследования, осуществлял руководство и контроль над проведением научного эксперимента и проводил консультации в ходе эксперимента. А. А. Хвостов – предложил методику проведения эксперимента, обработал экспериментальные данные, выполнил расчеты и коррекцию рукописи до ее подачи в редакцию. А. А. Журавлев – провел обзор литературных источников по исследуемой проблеме, обработал экспериментальные данные, выполнил расчеты и коррекцию рукописи до ее подачи в редакцию. М. Г. Магомедов – провел эксперимент, обработал экспериментальные данные и организовал производственные испытания А. С. Таратухин – провел эксперимент и обработал экспериментальные данные. И. В. Плотникова – провела обзор литературных источников по исследуемой проблеме и корректировала рукопись до ее подачи в редакцию.

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность

Авторы выражают благодарность руководству АО «Хлебозавод № 7» (Воронеж) за предоставленную возможность проведения научного эксперимента в межрегиональном научно-исследовательском центре инновационных технологий хлебопечения.

Contribution

G.O. Magomedov developed the research concept, supervised the experiment, and provided consultations. A.A. Khvostov developed the methodology, processed the data, performed calculations, and proofread the manuscript. A.A. Zhuravlev wrote the review, processed thedata, performed calculations, and corrected proofread the manuscript. M.G. Magomedov conducted the experiment, processed the data, and organized production tests. A.S. Taratukhin conducted the experiment and processed thedata. I.V. Plotnikova wrote the review and proofread the manuscript.

All authors equally participated in the research and are responsible for any potential cases ofplagiarism.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the management of J-SC Khlebozavod No. 7 (Voronezh) for the opportunity to conduct the experiment at the Interregional Research Center for Innovative Baking Technologies.

References/Список литературы

1. Rudnev SD, Shevchenko TV, Ustinova YuV, Kryuk RV, Ivanov VV, Chistyakov AM. Technology and theory of mechanically activated water in bakery industry. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):768–778. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-768-778

2. Alekhina NN, Ponomareva EI, Zharkova IM, Grebenshchikov AV. Assessment of functional properties and safety indicators of amaranth flour grain bread. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(2):323–332. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-323-332

3. Smertina ES, Fedyanina LN, Lyakh VA. Hepatoprotective effect of breads with extracts of plants growing in the Far East. Foods and Raw Materials. 2020;8(2):232–240. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-2-232-240

4. Gabdukaeva LZ, Sorokina ES. Modern market of functional bakery products. Bulletin of the Technological University. 2017;20(1):151–154. (In Russ.). [Габдукаева Л. З., Сорокина Е. С. Характеристика современного рынка хлебобулочных изделий для функционального питания // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 1. С. 151–154.].

5. Romanchikov SA. Technology of bread using electric kleb-baiking KHPE-IUZ furnace with ultrasound in pulse mode. Food Industry. 2019;(2):44–48. (In Russ.). [Романчиков С. А. Технология изготовления хлеба с использованием электрической хлебопекарной печи ХПЭ-ИУЗ с ультразвуком в импульсном режиме // Пищевая промышленность. 2019. № 2. С. 44–48.].

6. Garg A, Malafronte L, Windhab EJ. Baking kinetics of laminated dough using convective and microwave heating. Food and Bioproducts Processing. 2019;115:59–67. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.02.007

7. Magomedov GO, Plotnikova IV, Magomedov MG, Cheshinsky VL. Sanitary-technological events of bread production without yeast. Hygiene and Sanitation. 2019;98(7):777–782. (In Russ.). https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-7-777-782

8. Kalla AM, Devaraju R. Microwave energy and its application in food industry: A review. Asian Journal of Dairy and Food Research. 2017;36(1):37–44. https://doi.org/10.18805/ajdfr.v0iOF.7303

9. Kumar C, Karim MA. Microwave-convective drying of food materials: A critical review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017;59(3):379–394. https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269

10. Chizoba Ekezie F-G, Sun D-W, Zhang H, Cheng J-H. Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. Trends in Food Science and Technology. 2017;67:58–69. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.014

11. Therdthai N, Tanvarakom T, Ritthiruangdej P, Zhou W. Effect of microwave assisted baking. Journal of Food Quality. 2016;39(4):245–254. https://doi.org/10.1111/jfq.12207

12. Kulishov BA, Novoselov AG, Ivaschenko SYu, Gusarov NE. Application of electrocontact heating in bakery: Review. Polzunovskiy Vestnik. 2019;(1):106–113. (In Russ.). [Применение электроконтактного нагрева в хлебопечении: обзор / Б. А. Кулишов [и др.] // Ползуновский вестник. 2019. № 1. С. 106–113.].

13. Alexeev GV. Investigation of energy and resource saving opportunities for baking bakery products. Scientific News. 2018;(11):20–25. (In Russ.). [Алексеев Г. В. Исследование возможностей повышения энерго- и ресурсосбережения при выпечке хлебо-булочных изделий // Научные известия. 2018. № 11. С. 20–25.].

14. Kutlu N, Pandiselvam R, Saka I, Kamiloglu A, Sahni P, Kothakota A. Impact of different microwave treatments on food texture. Journal of Texture Stud. 2021. https://doi.org/10.1111/jtxs.12635

15. Ushakova NF, Kopysova TS, Kasatkin VV, Kudryashova AG. Experience of microwave heating application for food production. Food Industry. 2013;(10):30–32. (In Russ.). [Опыт применения СВЧ-энергии при производстве пищевых продуктов / Н. Ф. Ушакова [и др.] // Пищевая промышленность. 2013. № 10. С. 30–32.].

16. Rushchits AA, Shcherbakova EI. Use of microwave heating in food industry and public catering. Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2014;2(1):9–15. (In Russ.). [Рущиц А. А., Щербакова Е. И. Применение СВЧ-нагрева в пищевой промышленности и общественном питании // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2014. Т. 2. № 1. С. 9–14.].

17. Bou-Orm R, Jury V, Boillereaux L, Le-Bail A. Microwave baking of bread; a review on the impact of formulation and process on bread quality. Food Reviews International. 2021. https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1931299

18. Wang M, Sun M, Zhang Y, Chen Y, Wu Y, Ouyang J. Effect of microwave irradiation-retrogradation treatment on the digestive and physicochemical properties of starches with different crystallinity. Food Chemistry. 2019;298. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125015

19. Houšová J, Hoke K. Temperature profiles in dough products during microwave heating with susceptors. Czech Journal of Food Sciences. 2018;20(4):151–160. https://doi.org/10.17221/3526-CJFS

20. Bhatt K, Vaidya D, Kaushal M, Gupta A, Soni P, Arya P, *et al.* Microwaves and radiowaves: In food processing and preservation. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2020;9(9):118–131. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.909.015

21. Guzik P, Kulawik P, Zając M, Migdał W. Microwave applications in the food industry: an overview of recent developments. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1922871

22. Thuengtung S, Ogawa Y. Comparative study of conventional steam cooking and microwave cooking on cooked pigmented rice texture and their phenolic antioxidant. Food Science and Nutrition. 2020;8(2):965–972. https://doi.org/10.1002/fsn3.1377

23. Shapiro L, Stokman D. Computer vision. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy; 2013. 752 p. (In Russ.). [Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 752 с.].