

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ХЛЕБА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХМЕЛЕВОЙ ЗАКВАСКИ В ПЕЧАХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Валентина А. Буховец, Татьяна В. Кириллова,
Надежда А. Фокина, Иван В. Романов

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова»,
Театральная пл., д. 1, г. Саратов, 410005, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена исследованиям процессов формирования структуры выпекаемых тестовых заготовок на пшеничной и хмелевой заквасках и изменениям свойств готовых изделий и полуфабрикатов в зависимости от способов выпечки.

В тестовой заготовке при выпечке под воздействием тепла и влаги протекает целый комплекс физических, химических и биохимических процессов, что вызывает глубокие изменения в тесте-хлебе. Продолжительность и интенсивность процессов, протекающих на поверхности и во внутренних слоях заготовки при выпечке, зависят от температуры. Поэтому создание оптимальных режимов прогрева выпекаемой тестовой заготовки на различных этапах позволяет получить изделия требуемого качества.

Для моделирования процессов формирования мякиша, изменения температуры внутри тестовой заготовки упека, удельного объема с течением времени при различных способах ведения теста и выпечки применялись регрессионные модели, учитывающие влияние качественных факторов. Каждый качественный фактор, имеющий две градации, заменялся одной бинарной переменной. Решение многокритериальной задачи оптимизации показало, что оптимальных значений исследуемые показатели достигают при выпечке в конвектомате и приготовлении теста на хмелевой закваске.

Ключевые слова: ротационная печь, пароконвектомат, хмелевая, пшеничная закваски, упек, площадь пропеченного мякиша, температура

Для цитирования: Моделирование технологии производства хлеба с использованием хмелевой закваски в печах различного типа / Буховец В. А. [и др.] // Новые технологии. 2020. Т. 15, № 4. С. 22–31. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2020-15-4-22-31>

BREAD PRODUCTION TECHNOLOGY MODELLING USING HOP STARTER IN OVENS OF VARIOUS TYPES

Valentina A. Bukhovets, Tatiana V. Kirillova,
Nadezhda A. Fokina, Ivan V. Romanov

FGBOU VO «Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov»,
1 Teatralnaya sq., Saratov, 410005, the Russian Federation

Annotation. The article studies the processes of structure formation of baked dough pieces using wheat and hop starters and changes in the properties of finished products and semi-finished products depending on the baking methods.

A whole complex of physical, chemical and biochemical processes takes place in the dough piece during baking under the influence of heat and moisture, which causes considerable changes in the bread dough. These processes cause changes in the baked dough piece, that cause turning the dough into bread. Duration and intensity of the processes occurring on the surface and in the inner layers of the dough piece during baking depend on the temperature. Therefore, creation of optimal modes of heating the baked dough piece at various stages allows you to get products of the required quality.

To simulate the processes of crumb formation, changes in temperature inside the dough piece of baking, and specific volume over time with different methods of dough and baking, regression models were used, that take into account the influence of qualitative factors. Each qualitative factor having two grades was replaced by one binary variable. The solution of a multicriteria optimization problem showed that the studied indicators reach the optimal values when baking in an air-o-steam and preparing a dough using hop starter.

Keywords: rotary oven, air-o-steam, hop and wheat starters, oven loss, baked crumb area, temperature

For citation: *Bread production technology modelling using hop starter in ovens of various types / Bukhovets VA [et al.] // New technologies. 2020. Vol. 15, No. 4. P. 22–31. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2020-15-4-22-31>*

Введение. Мини-пекарни уверенно завоёвывают рынок хлебобулочных изделий, вытесняя продукцию крупных хлебозаводов из потребительской корзины. Появились сетевые кондитерские и пекарни, в которых выпечка происходит непосредственно перед продажей. Данные пекарни оснащены печами шкафного типа и пароконвектоматами. Хлебопекарные печи являются основным технологическим оборудованием, определяющим производительность хлебобулочных изделий.

Однако изучение процесса выпечки хлебобулочных изделий в данных печах при тестоведении на заквасках остается недостаточным и требует уточнения по рекомендациям их использования.

Цель исследований: разработать математические модели показателей технологического процесса производства хлебобулочных изделий на основе оптимальных режимов выпечки.

Материалы и методы. Исследования проведены в ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова» в период 2017–2020 гг.

За основу была выбрана рецептура хлеба пшеничного высшего сорта (ГОСТ

Р 58233-2018). Способ тестоведения двухфазный на пшеничной и хмелевой заквасках. Тестовые заготовки выпекали в ротационной печи и пароконвектомате. Температура паровоздушной среды пекарной камеры 220° С.

Количественная оценка влияния способов ведения теста и выпечки на температуру внутри выпекаемой тестовой заготовки, площади пропеченного мякиша, упека, удельного объема проводилась с помощью математических моделей.

Учет типа закваски и типа печи при построении модели производили введением бинарных фиктивных переменных. Качественные факторы, имеющие две градации, заменялись одной бинарной переменной (таблица 1).

Результаты и обсуждения. Температура внутри тестовой заготовки (ТЗ), достигнув предельного значения, перестает увеличиваться при дальнейшем прогревании в пекарной камере. Для математического описания затухающих процессов используем логистическую функцию вида

$$f(t) = \frac{b}{1 + ce^{-at}}$$

Оценки параметров функции найдены методом наименьших квадратов

Таблица 1

Замена качественных факторов бинарными переменными

Table 1

Replacing qualitative factors with binary variables

Тип закваски	Значение бинарной переменной y
пшеничная	0
хмелевая	1
Тип печи	Значение бинарной переменной z
ротационная печь	0
пароконвектомат	1

(МНК) и приведены в таблице 2. Графики логистических кривых изображены на рисунке 1.

Изменение величины упека, удельного объема, площади пропеченного мякиша, температуры внутри выпекаемой

Таблица 2

Оценки параметров логистических функций

Table 2

Estimates of the parameters of logistic functions

Способы ведения теста и выпечки	Коэффициенты модели			Коэффициент корреляции
	a	b	c	
ТЗ на пшеничной закваске (ротационная печь)	0,100	127,695	4,474	0,995
ТЗ на хмелевой закваске (ротационная печь)	0,100	123,789	4,140	0,978
ТЗ на пшеничной закваске (пароконвектомат)	0,100	171,161	8,121	0,983
ТЗ на хмелевой закваске (пароконвектомат)	0,100	124,754	4,628	0,986

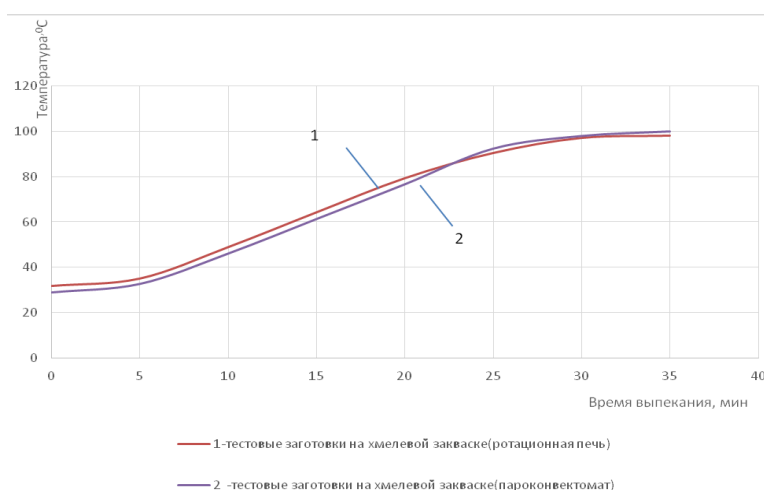


Рис. 1. Моделирование изменения температуры внутри тестовой заготовки

Fig. 1. Simulation of temperature changes inside a dough piece

тестовой заготовки происходит по закону затухающего роста. Такие процессы описываются сигмоидой [1, 2]. На небольшом промежутке времени функцию отклика для этих параметров можно представить суммой степенных функций:

$$f_k(t, y, z) = a_0 + a_1 t + a_2 y + a_3 z + a_4 t^{1.5} + a_5 t^2 y + a_6 t^2 z + a_7 yz \quad k = 1, \dots, 4'$$

где t – температура выпекания,

y, z – бинарные переменные «тип закваски», «тип печи» соответственно. Для оценки параметров этого уравнения используется метод наименьших квадратов (МНК).

Таблица 3

Оценки параметров уравнения, их значимость и результаты проверки адекватности моделей с бинарными переменными

Table 3

Estimates of the parameters of the equation, their significance and the results of checking the adequacy of models with binary variables

Наименование показателя	Коэффициенты		Нижние 95% границы доверительного интервала	Верхние 95% границы доверительного интервала	Коэффициент R Наблюдаемое значение	Г-критерий Фишера	Значимость F
Упек, %	a0	2,801	0,147	5,455	0,985	56,367	0,000
	a1	0,268	–0,313	0,849			
	a2	–0,155	–1,761	1,451			
	a3	–3,290	–4,897	–1,684			
	a4	0,036	–0,069	0,140			
	a5	0,000	–0,004	0,003			
	a6	0,004	0,000	0,008			
Удельный объем, см ³ /г	a7	0,840	–0,849	2,529	0,960	20,323	0,000
	a0	124,28	66,51	182,06			
	a1	12,90	0,25	25,55			
	a2	–104,19	–139,16	–69,23			
	a3	–28,28	–63,24	6,69			
	a4	–1,56	–3,83	0,70			
	a5	0,02	–0,07	0,10			
Площадь пропеченного мякиша, мм ²	a6	0,02	–0,06	0,11	0,969	26,477	0,000
	a7	103,10	66,33	139,87			
	a0	1032,427	–1613,901	3678,755			
	a1	–561,443	–1141,014	18,129			
	a2	1869,335	267,754	3470,916			
	a3	88,500	–1513,081	1690,081			
	a4	163,614	59,793	267,434			
	a5	–1,782	–5,677	2,112			
	a6	0,237	–3,658	4,131			
	a7	–450,600	–2134,745	1233,545			

Продолжение таблицы 3

Температура внутри выпекае- мой тестовой заготовки, °C	a0	22,798	6,867	38,729	0,986	61,719	0,000
	a1	1,206	-2,283	4,695			
	a2	2,348	-7,294	11,989			
	a3	-2,711	-12,353	6,930 0,986394936			
	a4	0,376	-0,249	1,001			
	a5	-0,006	-0,029	0,018			
	a6	0,009	-0,014	0,033			
	a7	-2,400	-12,539	-7-,739			

В таблице 3 приведены оценки ко-
эффициентов модели. На рисунках 2–13
представлены графики зависимостей по-
казателей от времени выпекания, типа
печи, типа закваски.

Связь между показателями и управляв-
шими факторами t , y , z можно считать до-
статочно тесной для всех моделей. Все мо-
дели адекватны при уровне значимости 5%.
Наиболее значимым является коэффициент

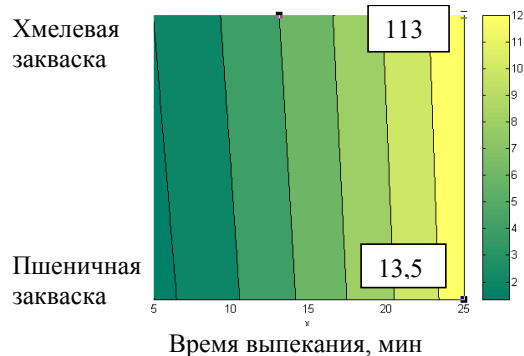


Рис. 2. Двумерные сечения поверхности отклика (пароконвектомат) числа на кривых – значения упека, %

Fig. 2. Two-dimensional sections of a number response surface (air-o-steam) on the curves are the values of oven loss, %

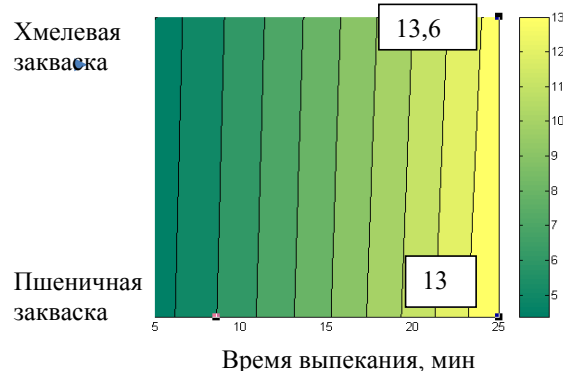
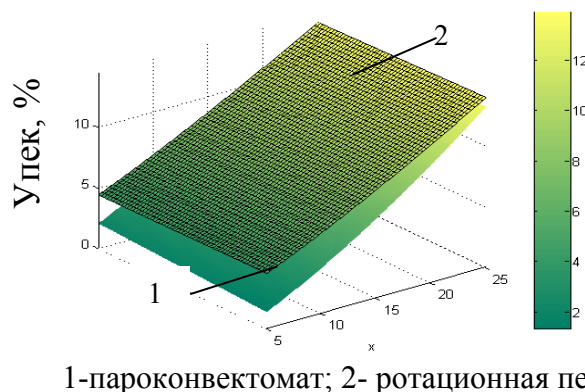


Рис. 3. Двумерные сечения поверхности отклика (ротационная печь) числа на кривых – значения упека, %

Fig. 3. Two-dimensional sections of a number response surface (rotary oven) on the curves are the values of oven loss, %



1-пароконвектомат; 2- ротационная печь

Рис. 4. Общий вид поверхности отклика (упек,%)

Fig. 4. General view of the response surface (oven loss,%)

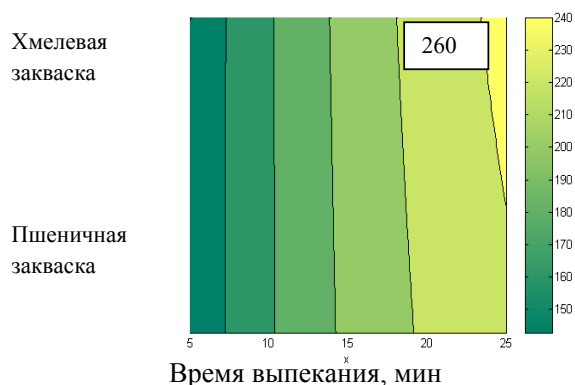


Рис. 5. Двумерные сечения поверхности отклика (пароконвектомат) числа на кривых – значения удельного объема, $\text{см}^3/\text{г}$

Fig. 5. Two-dimensional sections of a number response surface (air-o-steam) on the curves are the values of oven, $\text{см}^3/\text{г}$

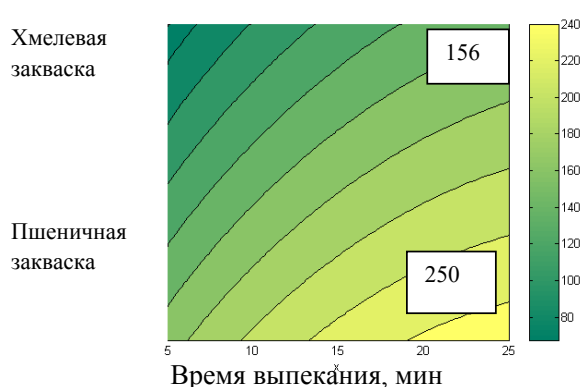
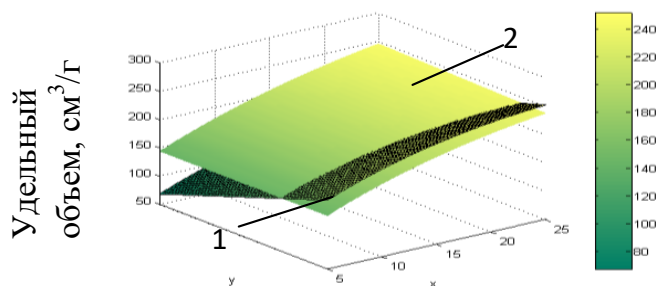


Рис. 6. Двумерные сечения поверхности отклика (ротационная печь) числа на кривых – значения удельного объема, $\text{см}^3/\text{г}$

Fig. 6. Two-dimensional sections of a number response surface (rotary oven) on the curves are the values of oven, $\text{см}^3/\text{г}$



1 – Пароконвектомат; 2 – Ротационная печь

Рис. 7. Общий вид поверхности отклика (удельный объем, $\text{см}^3/\text{г}$)

Fig. 7. General view of the response surface (specific volume, $\text{см}^3/\text{г}$)

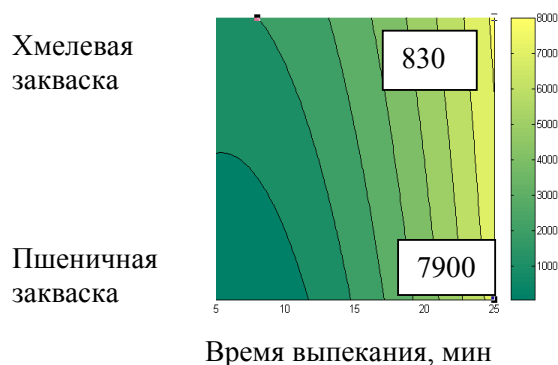


Рис. 8. Двумерные сечения поверхности отклика (пароконвектомат) числа на кривых – значения площади пропеченного мякиша, мм^2

Fig. 8. Two-dimensional sections of a number response surface (air-o-steam) on the curves are the values of baked crumb area, мм^2

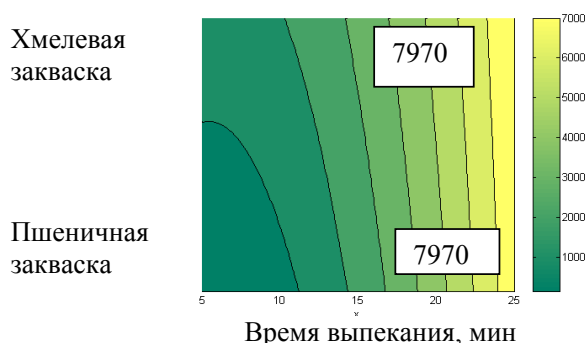


Рис. 9. Двумерные сечения поверхности отклика (ротационная печь) числа на кривых – значения площади пропеченного мякиша, мм^2

Fig. 9. Two-dimensional sections of a number response surface (rotary oven) on the curves are the values of baked crumb area, мм^2

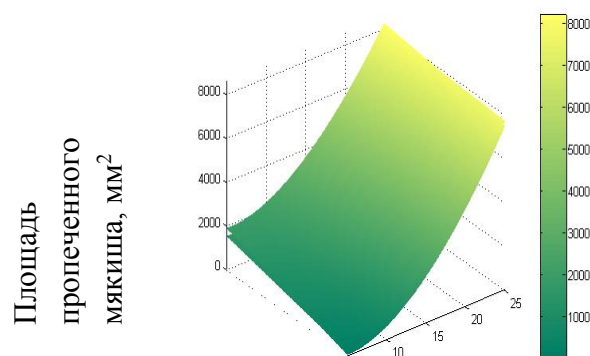


Рис. 10. Общий вид поверхности отклика (площадь пропеченного мякиша, мм²)

Fig. 10. General view of the response surface (baked crumb area, mm²)

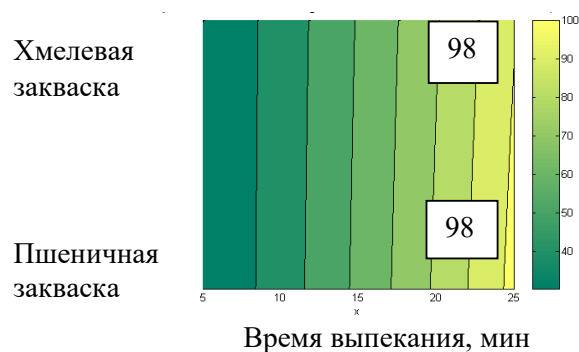


Рис. 11. Двумерные сечения поверхности отклика (пароконвектомат) числа на кривых – значения температуры внутри выпекаемой тестовой заготовки, °C

Fig. 11. Two-dimensional sections of a number response surface (air-o-steam) on the curves are the temperature values inside a baked dough piece, °C

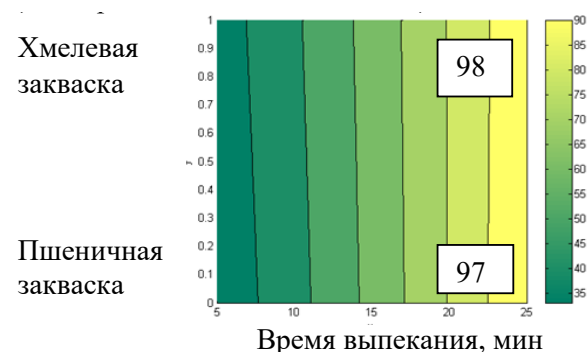


Рис. 12. Двумерные сечения поверхности отклика (ротационная печь) числа на кривых – значения температуры внутри выпекаемой тестовой заготовки, °C

Fig. 12. Two-dimensional sections of a number response surface (rotary oven) on the curves are the temperature values inside a baked dough piece, °C

piece, °C

dough piece, °C

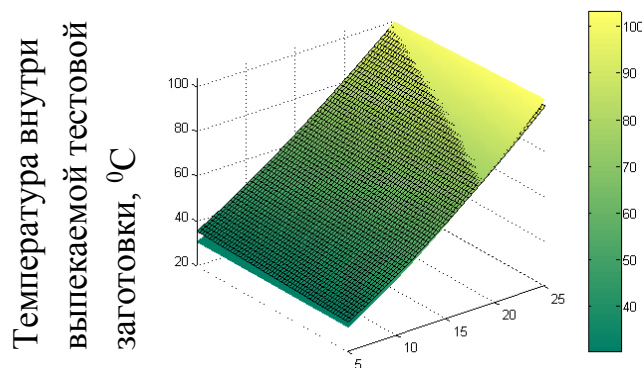


Рис. 13. Общий вид поверхности отклика (температура внутри выпекаемой тестовой заготовки, °C)

Fig. 13. General view of the response surface (temperature inside a baked dough piece, °C)

при производстве бинарных переменных, что свидетельствует о сильном влиянии совместного действия типа закваски и типа печи на исследуемые показатели. Данные модели могут быть пригодны для оптимизации технологических процессов [3, 4].

$$f_1(t, y, z) = 2,801 + 0,268_1 t - 0,155 y - 3,29 z + 0,036 t^{1,5} + 0,004 t^2 z + 0,84 y z \rightarrow \min ;$$
$$f_2(t, y, z) = 124,28 + 12,9_1 t - 104,19 y - 28,3 z - 1,56_4 t^{1,5} + 0,02 t^2 y + 0,02 t^2 z + 103,1 y z \rightarrow \max$$

при ограничениях $t > 0, y \in \{0,1\}^i, z \in \{0,1\}$.

Задача многокритериальной оптимизации методом аддитивной свертки преобразуется в однокритериальную задачу

$$z = \alpha_1 f_1(t, y/z) / f_1^*(t, y/z) + \alpha_2 f_2(t, y, z) / f_2^*(t, y/z) \rightarrow \max ,$$

где $\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \alpha_1 \geq 0, \alpha_2 \geq 0$. $f_1^*(t, y/z), f_2^*(t, y/z)$ – оптимальные значения критериев. Вектор весовых коэффициентов критериев $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$ определяет приоритет соответствующего критерия.

При $\alpha = (1/2, 1/2)$ получим однокритериальную задачу:

$$z(t, y, z) = 0,347 + 0,035 t - 0,206 y - 0,181_3 z - 0,002 t^{1,5} + 0,000 t^2 y + 0,000 t^2 z + 0,231 y z \rightarrow \max$$

при ограничениях $t > 0, y \in \{0,1\}^{ii}, z \in \{0,1\}$. Решением задачи является точка $t = 25., y = 1, z = 1$.

Выводы. В результате проведенных исследований было установлено, что выпекание хлебобулочных изделий в пароконвектомате имеет свои особенности. Скорость изменения температуры в центре мякиша неодинакова: в начале процесса выпекания температура меняется медленнее, чем в ротационной печи, затем возрастает. Хлеб, выпеченный в

пароконвектомате, имеет по сравнению с другими образцами большую площадь пропеченного мякиша. В тестовых заготовках на хмелевой закваске прогревание и формирование мякиша происходит быстрее, удельный объем и упек при данных способах ведения теста и выпечки становится оптимальным. Решением задачи является точка $t = 25., y = 1, z = 1$.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ангелюк В.П., Буховец В.А. Критериальная зависимость параметров процесса окончательной расстойки тестовых заготовок пшеничного батона с нутом // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2014. С. 53–55.
2. Sadygova M.K., Belova M.V., Rysmukhambetova G.E. Technology solutions in case of using chickpea flour in industrial bakery // Scientific Study and Research: Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry. 2018. Т. 19, № 2. С. 169–180.
3. Пономарева Е.И., Магомедов Г.О., Зубкова Е.В. Выбор рациональной влажности теста для хлебобулочного изделия на патоке // Инновационные решения при производстве продуктов питания из растительного сырья: сборник научных статей и докладов II Международной научно-практической конференции. Воронеж, 2016. С. 220–223.
4. Маркова Ю.В., Марков А.С., Романов А.С. Разработка оптического метода определения объема хлебобулочных изделий // Новое в технологии и технике функциональных продуктов

питания на основе медико-биологических воззрений: материалы VI Международной научно-технической конференции. Воронеж, 2017. С. 1024–1025.

5. Experiment and multiphysic simulation of dough baking by convection, infrared radiation and direct conduction [Electronic resource] / V. Nicolas [et al.] // *International Journal of Thermal Sciences*. 2017. Vol. 115. P. 65–78. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.01.018>.

6. Дерканосова Н.М., Журавлев И.А., Сорокина А.А. Моделирование и оптимизация технологических процессов пищевых производств. Практикум: учебное пособие. Воронеж: ВГТА, 2011. 196 с.

REFERENCES:

1. Angelyuk V.P., Bukhovets V.A. Criterion dependence of the parameters of the final proofing process of dough pieces of wheat loaf with chickpeas // *Bulletin of the Saratov State Agrarian University named after I. N.I. Vavilov*. 2014. P. 53–55.

2. Sadygova M.K., Belova M.V., Rysmukhambetova G.E. Technology solutions in case of using chickpea flour in industrial bakery // *Scientific Study and Research: Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*. 2018. V. 19, No. 2. P. 169–180.

3. Ponomareva E.I., Magomedov G.O., Zubkova E.V. The choice of the rational dough moisture for bakery products using syrup // *Innovative solutions in the production of food from vegetable raw materials: a collection of scientific articles and reports of the II International scientific and practical conference*. Voronezh, 2016. P. 220–223.

4. Markova Yu.V., Markov A.S., Romanov A.S. Development of an optical method for determining the volume of bakery products // *New in technology and technology of functional food based on medical and biological views: materials of the VI International scientific and technical conference*. Voronezh, 2017. P. 1024–1025.

5. Experiment and multiphysic simulation of dough baking by convection, infrared radiation and direct conduction [Electronic resource] / V. Nicolas [et al.] // *International Journal of Thermal Sciences*. 2017. Vol. 115. P. 65–78. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.01.018>.

6. Derkanosova N.M., Zhuravlev I.A., Sorokina A.A. Modelling and optimization of technological processes of food production. Practicum: a teaching guide. Voronezh: VSTA, 2011. 196 p.

Информация об авторах / Information about the authors:

Валентина Алексеевна Буховец, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии продуктов питания» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова»;

e-mail: vbuhovets@yandex.ru

Татьяна Валерьяновна Кириллова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика, механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова»;

e-mail: fraktalsmsl@gmail.com

Надежда Александровна Фокина, ведущий микробиолог группы по проведению испытаний УНИЛ по определению качества пищевой и сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО «Саратовский

Valentina A. Bukhovets, Candidate of Technical Sciences, an associate professor of the Department of Food Technologies, FSBEI HE «Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov»;

e-mail: vbuhovets@yandex.ru

Tatyana V. Kirillova, Candidate of Technical Sciences, an associate professor of the Department of Mathematics, Mechanics and Engineering Graphics, FSBEI HE «Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov»;

e-mail: fraktalsmsl@gmail.com

Nadezhda A. Fokina, a leading microbiologist of the UNIL testing group to determine the quality of food and agricultural products, FSBEI HE «Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov»;

государственный аграрный университет
им. Н.И. Вавилова»;

e-mail: sgaulab@mail.ru

Иван Владимирович Романов, магистр кафедры «Технологии продуктов питания», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова»;

e-mail: romanov671games@gmail.com

e-mail: sgaulab@mail.ru

Ivan V. Romanov, Master of the Department of Food Technologies, FSBEI HE «Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov»;

e-mail: romanov671games@gmail.com