

УДК 664.655.1

Профессор С.Т. Антипов, доцент В.Ю. Овсянников,  
студент Я.И. Кондратьева

(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра машин и аппаратов пищевых производств,  
тел. (473) 255-38-96

## Расчет кинетики процесса выпечки бисквита

На основании введенных эквивалентных значений теплофизических величин и коэффициента теплоотдачи рассчитаны величины, отражающие кинетические закономерности процесса выпечки бисквита, позволяющие определить взаимосвязь продолжительности выпечки от температуры в пекарной камере, а также напряжение активной площади пода.

Based on the input values of the equivalent values of thermophysical units and the heat transfer coefficient were calculated: values that reflect the kinetics of the process of baking; values allowing to determine the relationship duration baking temperature in the baking chamber; the voltage of the active area of the hearth.

*Ключевые слова:* выпечка, кинетические закономерности, бисквит.

Выпечка – нестационарный процесс теплообмена с изменением агрегатного и коллоидного состояния материала, сопровождающийся перемещением и испарением влаги.

Под воздействием теплоты и влаги в тесте, являющемся по своему строению и химическому составу высокогидратированным коллоидным материалом, одновременно протекают тесно связанные между собой физические, биохимические, химические, микробиологические и коллоидные процессы.

При выпечке тесто нагревается без удаления влаги из основной массы и только с частичным удалением влаги из поверхностных слоев, которые обезвоживаются не только из-за испарения влаги и удаления ее в окружающую среду, но также благодаря перемещению влаги внутрь. Поэтому влажность основной массы теста несколько увеличивается. Такое состояние влажного материала обусловлено значительной разностью температур внутри теста в процессе выпечки. Поэтому характер протекания процесса определяется основными законами миграции влаги в коллоидных капиллярно-пористых телах при значительном температурном градиенте.

Перемещение влаги внутри тестовой массы в процессе выпечки происходит по законам теплопроводности и термовлагопроводности.

При соприкосновении влажного материала с начальным равномерным влагосодержанием с нагретым воздухом влага с поверхности начинает испаряться и покидать поверхность

материала, переходя путем диффузии в окружающую среду. При этом создается разность между влажностями последующих глубинных слоев материала и его поверхностного слоя, что вызывает перемещение влаги внутри материала к его поверхности [1].

Температурное поле теста при выпечке характеризуется тремя зонами: поверхностью изделия, зоной испарения и центром мякиша.

Процесс выпечки можно представить в следующем виде: вначале температурный градиент значителен и влага под его влиянием, преодолевая силы, вызываемые теплопроводностью, перемещается внутрь, в основном, в виде жидкости. Это перемещение происходит постепенно в виде распространяющейся волны влаги внутри теста. Толщина корки является функцией времени, причем одновременно с образованием корки влажность горячего изделия увеличивается по сравнению с начальной влажностью теста. Поскольку в капиллярах поверхностного слоя находится влажный воздух, то вследствие относительной термодиффузии, воздух стремится переместиться по направлению потока теплоты от поверхности тела внутрь, а водяной пар будет перемещаться к поверхности тела из внутренних слоев зоны испарения.

По мере прогрева теста температурный градиент уменьшается, и силы, вызываемые термовлагопроводностью, не могут преодолеть силы теплопроводности; они только предотвращают перемещение влаги к поверхности. К этому времени волна влаги под действием сил, вызываемых термовлагопроводностью, доходит до центральных слоев и повышает общую

влажность тестовой массы. Начиная с этого момента (второй период процесса выпечки), зона испарения углубляется внутрь материала с постоянной скоростью.

Скорость и характер протекания процесса выпечки в значительной мере зависят от степени увлажнения среды в первой стадии процесса и интенсивности конденсации пара на поверхности тестовой заготовки.

Механизм процесса выпечки в условиях повышенной влажности паровоздушной среды пекарной камеры обоснован закономерностями теории сорбции пара коллоидными капиллярно-пористыми материалами.

Интенсивность и длительность сорбции влаги, конденсируемой на поверхности и в поверхностных слоях куска теста, зависят от влажности паровоздушной смеси пекарной камеры, ее температуры и от температуры поверхностных слоев теста.

Конденсация влаги на поверхности куска теста прекращается, как только температура поверхности куска теста становится выше температуры точки росы. Поэтому в начале выпечки необходимо создать такие условия, которые обеспечили бы протекание процесса сорбции при хорошем контакте между паром и поверхностью теста; кроме того, при этом пар не должен перегреваться.

Конденсация пара, сорбция в начальной фазе и максимально возможное повышение температуры среды пекарной камеры на следующей фазе процесса выпечки интенсифицируют прогрев поверхностных слоев и создают достаточную разность между температурами слоев, усиливающую перемещение влаги от корки внутрь изделия.

Одновременно с этим выделяющаяся теплота сорбции также в значительной степени способствует закреплению формы изделия за счет процессов клейстеризации крахмала и коагуляции белков в массе изделия, а конденсирующаяся влага, растворяя сахара, подготавливает процесс карамелизации, обеспечиваящий получение тонкой корочки.

Повышение эффективности процесса выпечки мучных кондитерских изделий является актуальной научно-технической проблемой, имеющей большое экономическое значение. Выпечка осуществляется в хлебопекарных печах, от степени совершенства которых во многом зависят как стоимость и свойства изделий, так и общие затраты энергии на их получение. В настоящее время на долю процесса выпечки приходится 70 % всех энергозатрат при произ-

водстве мучных кондитерских изделий [2].

Нерациональное использование подводимой теплоты к выпекаемым изделиям происходит из-за неправильной оценки основных параметров процесса, учитывающих температуру выпечки и ее продолжительность во взаимосвязи со структурой и формой выпекаемой продукции.

Для правильного проведения процесса необходимо рассчитать его кинетические закономерности, позволяющие определить взаимосвязь продолжительности выпечки и температуры в пекарной камере, а также напряжение активной площади пода, что позволит наметить рациональные пути увеличения производительности печи.

Рассматривая выпекаемый пласт бисквита как сложное тело, состоящее из мякиша и корки, размеры и теплофизические свойства которых изменяются во время выпечки, следует оперировать их эквивалентными величинами.

Приближенный расчет продолжительности выпечки бисквита можно получить, используя уравнение температурной кривой с допущением, что выпекаемое изделие является простым телом с постоянными значениями физических констант, а температура на границе корки-мякиша постоянна и равна температуре испарения [3].

Рассчитаем время выпечки бисквитного коржа с размерами  $0,20 \times 0,30 \times 0,04$  м при следующих данных: средний коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha} = 15,1$  Вт/(м<sup>2</sup>·град); средний коэффициент теплопроводности бисквитного теста  $\lambda_{\text{пов}} = 0,2$  Вт/(м·К) [4].

Эквивалентный коэффициент теплопроводности при толщине корки  $s_k = 0,001$  м и толщине мякиша  $s_m = 0,04$  м может быть найден по формуле:

$$\lambda_{\text{эkv}} = \frac{R_{\text{эkv}}}{\frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{s_m}{\lambda_{\text{тм}}}}, \quad (1)$$

где  $R_{\text{эkv}}$  – эквивалентный радиус выпекаемого изделия, м;  $\lambda_k$ ,  $\lambda_{\text{тм}}$  – теплопроводности корки теста и тестового мякиша, Вт/(м·К). Используя справочные данные, примем  $\lambda_k = 0,055$  Вт/(м·К),  $\lambda_{\text{тм}} = 0,401$  Вт/(м·К).

Эквивалентный радиус определяется по формуле

$$R_{\text{эkv}} = \frac{1}{\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h}}, \quad (2)$$

где  $l$ ,  $b$ ,  $h$  – геометрические размеры коржа.

$$R_{\text{экв}} = \frac{1}{\frac{1}{0,2} + \frac{1}{0,3} + \frac{1}{0,04}} = 0,03 \text{ м.}$$

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{0,03}{\frac{0,001}{0,055} + \frac{0,04}{0,401}} = 0,254 \text{ Вт/(м·К)}$$

Эквивалентная удельная теплоемкость бисквита определяется по формуле:

$$c_{\text{экв}} = \frac{c_{\text{к}} \cdot s_{\text{к}} + c_{\text{тм}} \cdot s_{\text{м}}}{s_{\text{к}} + s_{\text{м}}}, \quad (3)$$

где  $c_{\text{к}}$ ,  $c_{\text{тм}}$  – теплоемкости корки теста и тестового мякиша бисквитного теста, кДж/(кг·К). Используя справочные данные, примем  $c_{\text{к}} = 1,47 \text{ кДж/(кг·К)}$ ,  $c_{\text{тм}} = 2,909 \text{ кДж/(кг·К)}$  [5].

$$c_{\text{экв}} = \frac{1,47 \cdot 0,001 + 2,909 \cdot 0,04}{0,001 + 0,04} = 2,874 \text{ кДж/(кг·К)}$$

Эквивалентная плотность бисквита определяется по формуле:

$$\rho_{\text{экв}} = \frac{\rho_{\text{к}} s_{\text{к}} + \frac{\rho_{\text{т}} + \rho_{\text{м}}}{2} s_{\text{м}}}{s_{\text{к}} + s_{\text{м}}}, \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{к}}$ ,  $\rho_{\text{т}}$ ,  $\rho_{\text{м}}$  – соответственно плотности корки бисквита, бисквитного теста и мякиша. Используя справочные данные, принимаем  $\rho_{\text{к}} = 485 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{\text{т}} = 450 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{\text{м}} = 480 \text{ кг/м}^3$ .

$$\rho_{\text{экв}} = \frac{485 \cdot 0,001 + \frac{450 + 480}{2} \cdot 0,04}{0,001 + 0,04} = 465,5 \text{ кг/м}^3.$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности бисквита в процессе его выпечки определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{экв}} = \frac{\lambda_{\text{экв}}}{c_{\text{экв}} \cdot \rho_{\text{экв}}}, \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{экв}} = \frac{0,254}{2874 \cdot 465,5} = 0,190 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Среднемассовая температура бисквита определяется по формуле:

$$t_{\text{мас}} = \frac{g_{\text{м}} c_{\text{м}} t_{\text{м}} + g_{\text{к}} c_{\text{к}} t_{\text{к}}}{g_{\text{м}} c_{\text{м}} + g_{\text{к}} c_{\text{к}}}, \quad (6)$$

где  $g_{\text{м}}$  и  $g_{\text{к}}$  – масса мякиша и корки в бисквите на 1 кг изделия, кг;  $c_{\text{м}}$  – теплоемкость мякиша бисквита, кДж/(кг·К). Используя справочные данные, примем  $c_{\text{м}} = 1,7 \text{ кДж/(кг·К)}$ .

$$t_{\text{мас}} = \frac{1,075 \cdot 1,7 \cdot 100 + 0,078 \cdot 1,47 \cdot 102}{1,075 \cdot 1,7 + 0,078 \cdot 1,47} = 100,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Безразмерная температура при температуре среды пекарной камеры  $t_{\text{с}} = 190 \text{ }^\circ\text{C}$  определяется по формуле:

$$\frac{1}{\theta} = \frac{t_{\text{с}} - t_0}{t_{\text{с}} - t_{\text{мас}}}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{\theta} = \frac{190 - 25}{190 - 100,1} = 1,83$$

Критерий Био определяется по формуле:

$$Bi = \frac{\bar{\alpha} \cdot R_{\text{экв}}}{\lambda_{\text{нов}}}, \quad (8)$$

$$Bi = \frac{15,1 \cdot 0,03}{0,2} = 2,3.$$

При  $Bi = 2,3$  имеем  $\delta^2 = 1,250$ ;  $M = 0,958$  согласно номограмме Д. В. Бурдина.

Время выпечки определяем по формуле:

$$\tau = \frac{R_{\text{экв}}^2}{\alpha_{\text{экв}} \delta^2} \ln\left(\frac{M}{\theta}\right), \quad (9)$$

$$\tau = \frac{(0,03)^2}{0,190 \cdot 10^{-6} \cdot 1,25} \ln(0,958 \cdot 1,83) = 2096 \text{ с,}$$

что составляет около 35 минут.

Производительность печи, отнесенная к 1 м<sup>2</sup> площади пода, занятого бисквитом, определяется по формуле:

$$g_a = \frac{2 \rho_{\text{биск}} R_{\text{экв}}}{\tau}, \quad (10)$$

$$g_a = \frac{2 \cdot 480 \cdot 0,03}{2096} = 0,0137 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$$

Принимая, что в процессе выпечки критерий  $Bi$  и физические константы не изменяются, на основании формулы (9) можно получить выражение для закона изменения температуры в толще бисквитного теста по времени, которое запишется следующим образом:

$$t_i = t_{\text{с}} - (t_{\text{с}} - t_{\text{нач}}) Me^{-\frac{\delta^2 \alpha_{\text{экв}} \tau_i}{R_{\text{экв}}^2}}, \quad (11)$$

где  $\tau_i < \tau$  – произвольный отрезок времени в интервале  $0 - \tau$  с.

По найденному значению  $\tau_i$  можно определить приращение энтальпий выпекаемого изделия за отрезок времени  $\Delta\tau$  и связанную с этим затрату теплоты на выпечку.

Так, при  $R_{\text{экв}} = 30 \text{ мм}$ ,  $t_{\text{с}} = 190 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 2096 \text{ с}$ ,  $M = 0,958$ ,  $\delta^2 = 1,250$  и  $\alpha_{\text{экв}} = 0,190 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  [6].

Определим показатель степени, фигурирующий в формуле (11)

$$m = \frac{\delta^2 \alpha_{\text{экв}}}{R_{\text{экв}}^2} \tau_i = \frac{1,25 \cdot 0,190 \cdot 10^{-6}}{0,03^2} \tau_i = 0,0002639 \tau_i$$

По уравнению (11) была построена зависимость распределения температуры в бисквите в процессе выпечки при различной температуре в пекарной камере (рисунок 1).

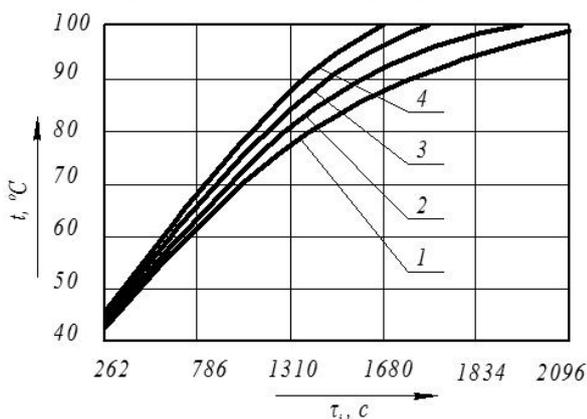


Рисунок 1 – Распределение температуры в бисквите в процессе выпечки при температуре в пекарной камере  $t, ^\circ\text{C}$ : 1 – 190; 2 – 200; 3 – 210; 4 – 220

Для выявления влияния температуры среды пекарной камеры на  $t_c, ^\circ\text{C}$  на снижение времени выпечки и пропорциональное ей повышение производительности печи  $\Delta\Pi$  были выбраны температурные интервалы среды пекарной камеры для которых по формуле (12) рассчитаны величины продолжительности выпечки и определены значения повышения производительности, отнесенные к продолжительности выпечки при  $t_c = 190 ^\circ\text{C}$ .

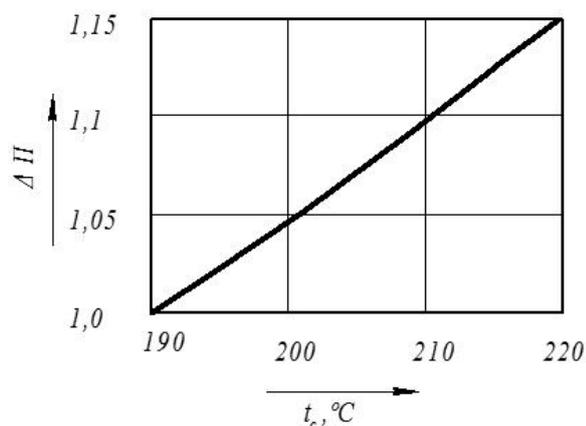


Рисунок 2 – Зависимость повышения производительности печи  $\Delta\Pi$  от температуры среды в пекарной камере  $t_c, ^\circ\text{C}$  в процессе выпечки при температуре в пекарной камере  $t, ^\circ\text{C}$ : 1 – 190; 2 – 200; 3 – 210; 4 – 220

$$\tau = 10^6 (0,54 - 0,0013 t_c) R_{\text{экв}}^{1,44}, \quad (12)$$

Из приведенного расчета следует, что повышение температуры пекарной среды и увеличение поверхностей нагрева в камере приводят к увеличению производительности печи. При этом одновременно растет также и коэффициент теплоотдачи, что в свою очередь увеличивает скорость выпечки.

Высокая температура интенсифицирует процесс выпечки бисквита, однако длительные воздействия высоких температур на корку не допускаются. В связи с этим следует признать, что для достижения максимальной скорости выпечки бисквитного теста в первой стадии выпечки после фазы конденсации пара и сорбции тесто должно подвергаться воздействию максимально допустимых температур, продолжительность которого должна быть тем меньше, чем выше температура греющих поверхностей.

При этом следует отметить, что чем выше тепловой поток в начале процесса выпечки и, чем быстрее повышается температура наружной поверхности корки, тем большее значение приобретает явление «выравнивания» температур внутри пласта выпекаемого бисквита.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ауэрман, Л. Я. Технология хлебопекарного производства [Текст] / Л. Я. Ауэрман. – СПб.: Профессия, 2005. - 416 с.
- 2 Драгилев, А. И. Технологическое оборудование кондитерского производства [Текст] / А. И. Драгилев, Ф. М. Хамидулин. - СПб.: Троицкий мост, 2011. - 360 с.
- 3 Теоретические основы пищевых технологий [Текст]: книга 2 / отв. редактор В. А. Панфилов. – М.: КолосС, 2009. – 800 с.
- 4 Михелев, А. А. Расчет и проектирование печей хлебопекарного и кондитерского производств [Текст]: 3-е изд., перераб. и доп / А. А. Михелев, Н. М. Ицкович, М. Н. Сигал и др. - М.: Пищевая промышленность, 1979. - 326 с.
- 5 Гинзбург, А. С. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов [Текст] / А. С. Гинзбург, И. М. Савина. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 280 с.
- 6 Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов [Текст] / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 290 с.

**REFERENCES**

1 Auerman, L. Y. Technology bakery production [Text] / L. Y. Auerman. - St. P.: Professiya, 2005. - 416 p.

2 Dragilev, A. I. Technology equipment for confectionery [Text] / A. I. Dragilev, F. M. Hamidulin. - St. P.: Troitsky most, 2011. - 360 p.

3 Theoretical foundations of food technologies [Text]: book 2 / editor V. A. Panfilov. - M.: ColosS, 2009. - 800 p.

4 Mikhelev, A. A. Calculation and design of furnaces bakery and confectionery products [Text]: 3rd ed., rev. and additional / A. A. Mikhelev, N. M. Itskovich, M. N. Segal et al - M.: Pishhevaya promyshlennost, 1979. - 326 p.

5 Ginsburg, A. S. Mass transfer and moisture exchange characteristics of food products [Text] / A. S. Ginzburg, I. M. Savina. - M.: Legkaya pishhevaya promyshlennost, 1982. - 280 p.

6 Ginsburg, A. S. Thermal characteristics of food products [Text] / A. S. Ginsburg, M. A. Gromov, G. I. Krasovskaya. - M.: Pishhevaya promyshlennost, 1980. - 290 p.