

ТЕОРИЯ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ

664.655.11:664.681.2

**КИНЕТИКА ТЕПЛОПРИТОКОВ ПРИ ВЫПЕЧКЕ  
БИСКВИТНОГО ПОЛУФАБРИКАТА****Е. Г. БОНДАРЕНКО, А. И. ДОРОХОВИЧ, Л. В. ДЕКУША,  
В. Г. ФЕДОРОВ, А. А. МИХЕЛЕВ**

Киевский технологический институт пищевой промышленности

Создание малогабаритных датчиков для измерения тепловых потоков позволило исследовать кинетику теплопоглощения при выпечке бисквитного полуфабриката.

Наша промышленность не располагает печами, в которых можно увязать тепловой режим с кинетикой выпечки бисквитного полуфабриката. Для выбора рационального режима его выпечки необходимо изучить закономерности внутреннего и внешнего тепло- и массообмена.

Количество подведенного тепла со стороны верхней, боковых и нижней поверхностей при выпечке мы определяли с помощью слоистых датчиков, представляющих собой вспомогательную стенку, составленную из большого числа дифференциальных термоэлементов, спай которых поочередно располагаются на гранях стенки [1]. Спаи термоэлектродов находятся в двух параллельных плоскостях, между которыми образуется разность температур  $\Delta t$  при прохождении потока тепла  $q$ . Генерируемый сигнал пропорционален плотности теплового потока  $Q$  и не зависит от абсолютного значения  $t$ .

Слоистые датчики имеют широкие пределы измерений  $q$  — от  $10^3$  до  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup> и низкую инерционность — от 5 до 10 с. Малые габариты датчика позволяют получить локальные значения  $q$  без искажения картины теплообмена в месте замера. Датчик очень удобен, он легко приклеивается к поверхности изделия перед выпечкой и снимается после окончания процесса, при промышленных испытаниях вместе с образцом перемещается вдоль рабочей камеры печи.

Для определения теплопритоков к изделию и их распределения по способам подвода (теплопроводностью через нижнюю и боковые поверхности формы, конвекцией и лучиспусканием через верхнюю поверхность изделия) были использованы при выпечке одной заготовки четыре слоистых датчика.

Датчики, предназначенные для измерения кондуктивных  $q$ , приклеивались клеем к центру нижней и боковых поверхностей формы до заполнения ее тестом. Для разделения лучистой и конвективной составляющих были использованы комбинированные тепломеры, состоящие из «темного» и «светлого» датчиков, наклеенных на общую тонкую медную пластинку для выравнивания  $t$  под датчиком. В связи с небольшой вязкостью и теста для бисквитного полуфабриката ( $\mu = 0,4 \pm 0,7$  Н·с/м<sup>2</sup>) на его поверхность в центре помещался кусочек марли  $40 \times 40$  мм, предварительно смоченной в тесте. На марлю помещался комбинированный тепломер.

Выпечка проводилась в лабораторной электропечи с подводом тепла от верхней и нижней греющих поверхностей, программным управлением и автоматическим регулированием  $t$  среды пекарной камеры, благодаря этому обеспечивалась идентичность подвода тепла к разным образцам в каждой серии опытов.

Тесто готовили по рецептуре № 1 [2]. Готовое тесто массой 210 г разливали в формы, заполняли их на высоту 30 мм.

Опыты [3] показали, что наилучшей температурой пекарной камеры является  $t=160\div 170^\circ\text{C}$ . Формы с тестом ставили в печь, предварительно нагретую до  $170^\circ\text{C}$ . Температура в печи на протяжении выпечки поддерживалась  $165\text{--}170^\circ\text{C}$ .

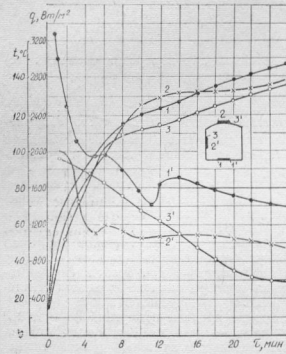


Рис. 1.

На рис. 1 представлены кривые тепловых потоков, полученные при выпечке бисквита в металлической форме. Наибольшее количество тепла подводится со стороны нижней греющей поверхности (кривая 1'). В первую минуту выпечки  $q=3000\text{ Вт/м}^2$  со стороны боковых поверхностей —  $2000\text{ Вт/м}^2$  (кривая 2'), затем кривые тепловых потоков падают в связи со снижением температурного градиента, так как нижние и боковые поверхности бисквита в первые минуты выпечки прогреваются со значительной скоростью —  $16\div 18\text{ град/мин}$ . Кроме того, возрастающей скорости падения  $q$  к тесту способствует пенооб-

разная структура теста. Нагревающийся воздух, захваченный массой бисквита во время сбивания, увеличивает теплоизоляционные свойства теста. После достижения  $t$  испарения нижней поверхностью начинается основной сток тепла, расходуемого на испарение влаги. Образующиеся водяные пары и захваченный при сбивании воздух, не имея выхода из замкнутого пространства формы и через центральные слои заготовки, создают изоляционный слой, снижающий количество воспринимаемого тепла, что особенно наглядно на кривой 1'.

При дальнейшем нагреве заготовки наблюдается перемещение влаги с периферии к центральным слоям, благодаря чему сопротивление изоляционного слоя понижается и на 11-й минуте выпечки наблюдается рост количества воспринимаемого тепла. Этому способствуют эндотермические процессы, происходящие в слоях, расположенных над нижней коркой. К 11-й минуте температура нижних слоев бисквитного полуфабриката близка к  $80^\circ\text{C}$ , т. е. в это время интенсивно проте-

кают денатурация белка и клейстеризация крахмала, требующие дополнительных затрат тепла. Начиная с 14-й минуты выпечки, кривые  $q$  падают благодаря образованию корки (толщина корки к 14-й минуте выпечки достигает  $\delta = 1$  мм), теплопроводность которой, как показано [4], меньше теплопроводности теста и мякни. Корка, толщина которой увеличивается по мере прогрева, создает возрастающий заградительный заслон для подвода тепла.

Кривая  $2'$  характеризует количество тепла, подводимого к изделию со стороны верхней поверхности. Максимальное количество тепла  $1900 \text{ Вт/м}^2$  подводится в первые минуты выпечки. В дальнейшем количество тепла, воспринимаемого верхней поверхностью, плавно уменьшается. Кривые  $1, 2, 3$  характеризуют  $i$  нижней, верхней и боковых поверхностей бисквита.

В промышленности при выпечке бисквита в металлических формах и противнях часто на нижнюю поверхность формы помещают бумажный вкладыш, который позволяет снизить количество поломок при извлечении бисквита из форм, а также уменьшить толщину нижней корки. В связи с этим изучали, как изменяются теплопритоки через нижнюю поверхность при выпечке бисквитного полуфабриката в металлических формах с бумажными вкладышами.

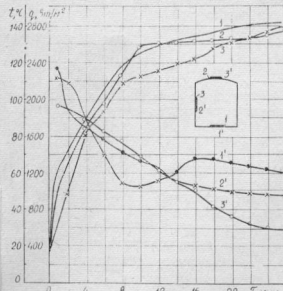


Рис. 2.

На рис. 2 приведены кинетические кривые зависимости при выпечке бисквита в металлической форме с бумажными вкладышами. В этом случае не наблюдается резкого отклонения в теплоподводе со стороны нижней и боковых поверхностей, потоки тепла выравниваются. В первые минуты выпечки тепловой поток со стороны нижней поверхности равен  $2300 \text{ Вт/м}^2$  (кривая  $1'$ ), со стороны боковых —  $2000 \text{ Вт/м}^2$  (кривая  $2'$ ). В данном случае имеет место перераспределение тепла от нижней поверхности к боковым, заготовка подвергается более равномерному прогреву, в остальном характер кривых аналогичен кривым, полученным при выпечке бисквита в металлической форме без бумажного вкладыша.

Кривая  $1'$  (рис. 2) отражает тепловой поток, получаемый изделием со стороны верхней поверхности, по своему характеру она не отличается от кривой  $3'$  (рис. 1), полученной при выпечке бисквита в металлической форме без бумажного вкладыша. Кривые  $1, 2, 3$  отражают соответственно  $i$  нижней, верхней и боковых поверхностей.

Исследованиями количественно определены тепловые потоки  $q$  через верхнюю (кривая  $2'$ ), нижнюю (кривая  $1'$ ) и боковые поверхно-

сти (кривая 3') формы при выпечке бисквита. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Количество тепла на выпечку, кДж/кг горячего бисквита, полученного через поверхности		
верхнюю	нижнюю	боковые
без вкладыша		
132,0—134,0   182,0—194,0   200,0—202,8		
с бумажным вкладышем		
133,7—136,0   153,3—165,0   228,0—230,0		

Применение методик [5] раздельного определения лучистой и конвективной составляющих  $q$  с помощью двух теплометров, имеющих разную степень черноты, при исследовании выпечки бисквитного полуфабриката в лабораторных условиях оказалось связанным с появлением дополнительных погрешностей. Как установлено в наших опытах, «светлый» датчик дает завышение показаний, что ведет к неправоначальному повышению доли конвективного теплообмена. Это связано с тем, что теплофизические характеристики теста бисквитного полуфабриката сильно отличаются от характеристик мякиша и корки через «светлый» теплометр проходит меньше тепла, чем через «темный», и тесто под ним позже превращается в мякиш и корку, что приводит к его завышенным показателям. Была проведена серия опытов с комбинированным теплометром. Применение такого датчика дало возможность объективно разделить теплопотоки на  $q_s$  и  $q_k$  без всяких поправок. Долю лучистого и конвективного теплообмена рассчитали по формулам:

$$q_s = \varepsilon \frac{q_1 - q_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}; \quad q_k = q_1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} q_s,$$

где  $q_1$  и  $q_2$  — теплопотоки, фиксируемые комбинированными датчиками «темной» и «светлой» секций;  
 $\varepsilon$  — степень черноты поверхности изделия, равная в среднем 0,9;  
 $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — степень черноты «светлой» и «темной» секций.

На рис. 3 представлены кривые, зафиксированные «темной» (кривая 2) и «светлой» (кривая 4) секциями комбинированного датчика.

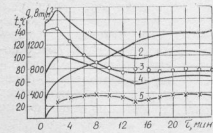


Рис. 3. Тепловые потоки, воспринимаемые верхней поверхностью.

Кривые 3 и 5 характеризуют долю лучистой и конвективной составляющих теплообвода, полученных при расчете (табл. 2). Кривые 5, 1 — температуру датчика и верхней поверхности под ним.

Исследование кинетики теплопотоков при выпечке бисквитного полуфабриката позволит разработать рациональный режим и создать современные конструкции печей с учетом специфики выпечки данных изделий.

**Вывод**

При помощи слонстых датчиков исследована кинетика теплопотоков при выпечке бисквитного полуфабриката, установлена доля лучистого и конвективного теплопотока.

Таблица 2

t, мин	q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>	q <sub>s</sub>   q <sub>k</sub>	
			Вт/м²	
0	1480	720	1408	52
2	1750	980	1447	303
4	1560	910	1221	339
6	1390	830	1052	338
8	1310	830	902	408
10	1140	720	789	351
12	1000	620	714	286
14	970	570	751	219
16	980	600	714	265
18	1010	650	676	334
20	1040	660	714	325
22	1020	660	676	344
24	1060	660	732	308
26	1040	680	676	364