

16. Conti M., Bellecci C., Charach Ch. Thermodynamic Design of a Phase Change Thermal Storage Module // Journal of Solar Energy Engineering. – 1996. – Vol. 118, № 5. – PP. 89-96.
17. Prasad R., Rao D.P. Theoretical Performance of a Solar Pond With Enhanced Ground Energy Storage // Journal of Solar Energy Engineering. – 1996. – Vol. 118, May. – PP. 101-106.
18. Zubair S.M., Al-Naglah M.A. Thermoeconomic Optimization of a Sensible-Heat Thermal Energy-Storage System: A Complete Storage Cycle // ASME. Journal of Energy Resources Technology. – 1999. – Vol. 121, № 4. – PP. 286-294.
19. Kangas M.T. Thermohydraulic Analysis of Ground as a Heat Source for Heat Pumps Using Vertical Pipes // ASME. Journal of Energy Resources Technology. – 1996. – Vol. 118, № 12. – PP. 301-305.
20. Мерзляков Э.И., Рыженко И.А., Цирульников А.С. Аналитическое решение теплопереноса в подземных циркуляционных системах // Докл. АН УССР. Серия А. – 1978. – С. 77-81.
21. Бессараб А.С., Долинский А.А., Драганов Б.Х. Оптимизация утилизационных теплообменных аппаратов // Пром. теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 1. – С. 32-36.
22. Adebisi G.A., Chenevert D.J. An Appraisal of One-Dimension Analytical Models for the Packed Bed Thermal Storage System Utilizing Sensible Heat Storage Materials // ASME. Journal of Energy Resources Technology. – 1996, Vol. 118, № 1. – PP. 44-49.
23. Драганов Б.Х. Термoeкономическая оптимизация энергетических систем при эксплуатационном и экологическом режимах их работы // Экотехнология и ресурсосбережение. – 2006. – № 2. – С. 8-10.

Получено 25.06.2007 г.

УДК 533.6\664.65

БАСОК Б.И., НАКОРЧЕВСКИЙ А.И., ПЕТРЕНКО Н.П., ХИБИНА М.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫПЕЧКЕ ХЛЕБА В ПЕЧИ ГТП-135

Запропоновано замкнутую схему рівнянь, яка дозволяє описати динаміку теплових і масопереносних процесів, які відбуваються в тісті-хлібі при формовому випіканні конвективним теплоносієм. Складено алгоритм спряженої задачі, яка пов'язує теплоаеродинамічні параметри теплоносія з внутрішніми характеристиками виробів.

Предложена замкнутая система уравнений, позволяющая описать динамику тепловых и массопереносных процессов, происходящих в тесте-хлебе, при формовой выпечке конвективным теплоносителем. Составлен алгоритм сопряженной задачи, связывающей теплоаэродинамические параметры теплоносителя с внутренними характеристиками изделий.

A closed system of the equations, allowing describe the heat-and-mass transfer dynamics of the processes, occurring in a dough-bread, when form bread is baking by the convection heat carrier is proposed. An algorithm of the dual problem, connecting heat-aerodynamic parameters of heat carrier with internal feature product is developed.

A, B, C – параметри;

a – коефіцієнт температуропроводности;

c – удельная теплоемкость;

h – высота слоя;

i – номер слоя;

M – масса;

q – плотность теплового потока;

S – площадь;

T – температура;

t – время;

u – скорость;

z – координата;

δ – приведенная толщина форм;

λ – удельная теплопроводность;

ρ – плотность;
 τ – напряжение трения.

Индексы:

A – алюминий;
 p – ряд;
 x – тесто-хлеб;

В отличие от подовой выпечки хлебобулочных изделий, когда большая часть поверхности теста непосредственно контактирует с обдувающим теплоносителем, при формовом производстве влияние ограждающих элементов тестовых заготовок возрастает. Число выпекаемых изделий и их распределение по объему печи идентично для обоих вариантов – в печь всегда загружается 9 рядов по 15 единиц в каждом ряду. Из-за сложного рельефа донной поверхности ряда (см. рис. 1) трудно надеяться на успешное моделирование обтекания такой поверхности. Поэтому ряд трактуется как прямоугольный параллелепипед с равномерным распределением теста по всей его горизонтальной поверхности (см. рис. 2). Поскольку формы контактируют с тестом–хлебом по донной и боковым поверхностям каждого изделия, то при моделировании допустимо сосредоточить всю массу форм внизу параллелепипеда. Таким образом, модель технологического блока одного ряда приобретает структуру, показанную на рис. 3. Тепловой поток сверху q_1 непосредственно действует на тесто-хлеб, а снизу q_2 – только после прохождения через массу формы исходного нижнего теплопотока q_A . В процессе выпечки зоны соответственно верхнего $h_1(t)$ и нижнего $h_2(t)$ теплового воздействия увеличиваются, а температура центральной части теста T_m не изменяется. После соприкосновения зон наступает взаимное влияние обоих тепловых потоков и температура плоскости соприкосновения начинает увеличиваться.

Настоящая часть исследования посвящена анализу собственно внутренних процессов в тесте-хлебе, происходящих под действием внешних тепло-аэродинамических воздействий на границах модели. Адекватность модели физической сути возможна только при соблюдении фундаментальных соотношений сохранения массы и энергии. Поскольку исходное тесто “размазано” по реальной плоскости ряда, то его исходная высота $h(0)$ должна вычисляться как

m – середина;
 i – номер слоя;
 w – значение в первом пристенном слое;
 0 – при $z = 0$;
 1 – верхний слой;
 2 – нижний слой.

$$h(0) = \frac{M_p}{\rho_x(0) \cdot S_p} \quad (1)$$

Аналогичным образом находится приведенная толщина тестовых форм

$$\delta = \frac{M_A}{\rho_A S_p} \quad (2)$$

Естественно, что величина $h(0)$ будет меньше фактической высоты теста в форме, а толщина – несколько больше толщины тестовых форм (см. рис. 2). С технологической точки зрения уменьшение $h(0)$ фактически отражает более развитую донную поверхность, чем плоскость (см. рис.1), и поэтому такое изменение выглядит корректным. Однако при решении внешней аэродинамической и тепловой задач толщину ряда следует принимать соответствующую реалиям, и результаты этого расчета прямо переносить на нижнюю и верхнюю поверхности модели, согласно рис. 3.

Данная задача относится к классу сопряженных задач нестационарной теплопроводности при переменных внешних условиях. Применение классических методов математической физики для их решения возможно только для простейших случаев, к которым эта задача не относится. Поэтому в основу предлагаемого ниже анализа положен специально разработанный метод, основанный на введении параметрического семейства распределений температур и концентраций вещества в твердых телах и на балансовых энергетических соотношениях [1-4].

Следуя этому методу, распределение температур в слоях h_i ($i = 1, 2$) будет

$$\frac{T_i - T_m}{T_{i0} - T_m} = \begin{cases} (1 - \eta_i)^2 [1 + \eta_i (2 - A_i)] & \text{при } A_i \leq 3, \\ (1 - \eta_i)^{A_i} & \text{при } A_i > 3, \end{cases} \quad (3)$$

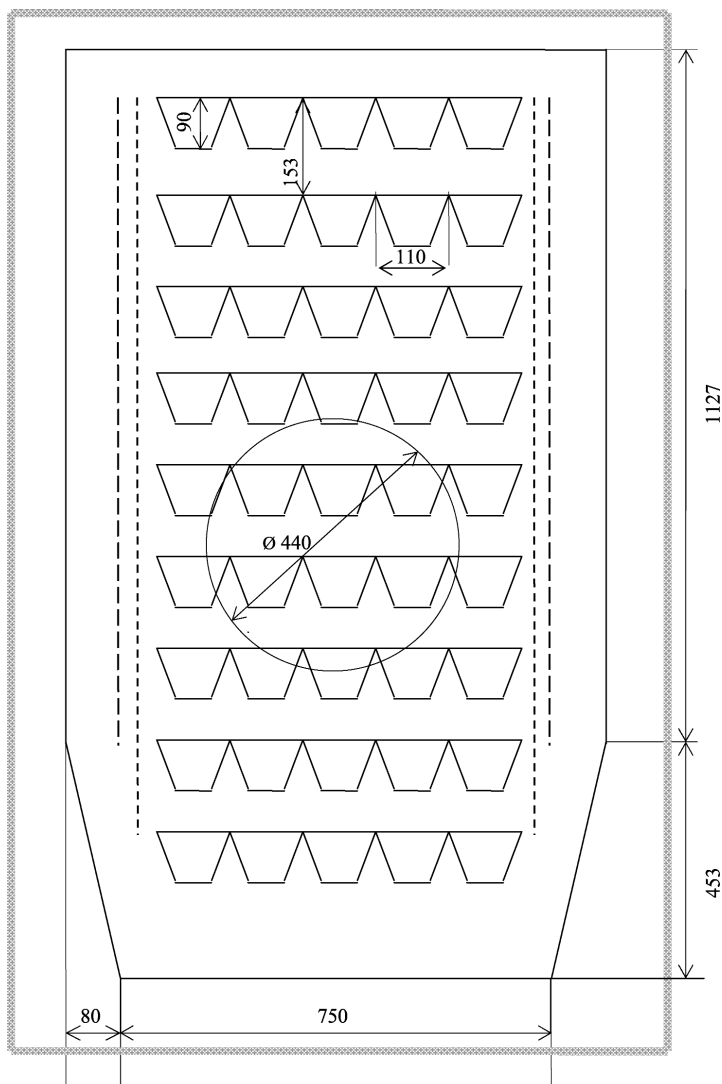


Рис. 1. Сечение рабочего пространства печи при формовой выпечке хлеба.

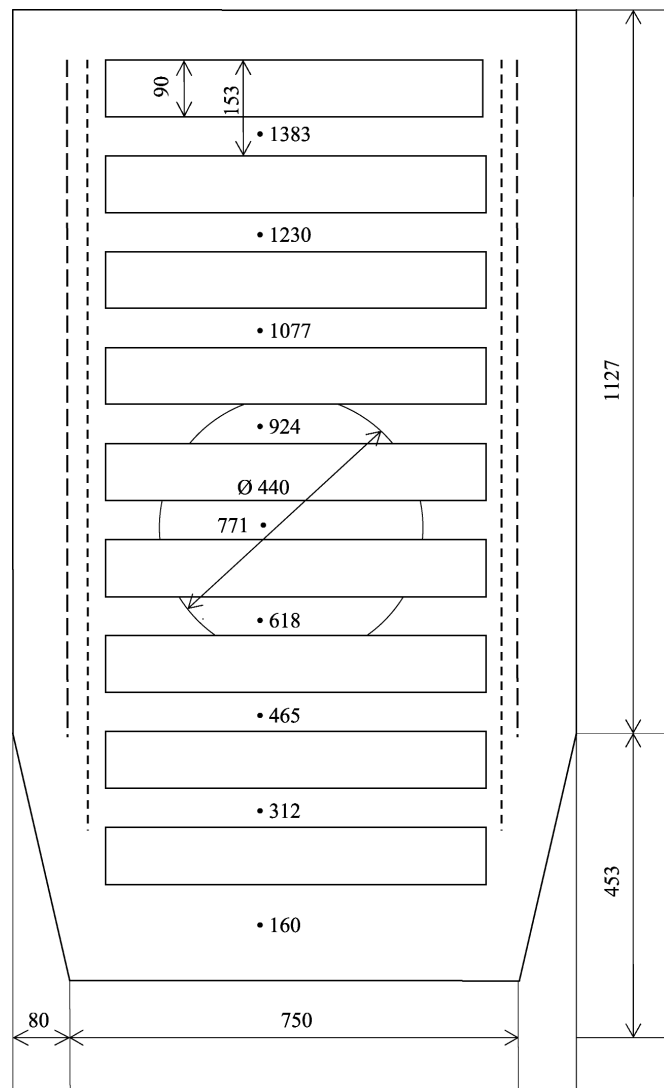


Рис. 2. Модельное представление сечения печи на рис. 1.

где

$$A_i = \frac{q_i h_i}{\lambda_i (T_{i0} - T_m)}, \quad \eta_i = \frac{z_i}{h_i} \quad (4)$$

Величина z_i отсчитывается от соответствующих верхней 1 и нижней 2 поверхностей (см. рис. 3). Темп изменения температур на поверхностях определяется выражением

$$\frac{\partial T_{i0}}{\partial t} = \frac{a_x (T_{i0} - T_m)}{h_i^2} \begin{cases} (4A_i - 6) & \text{при } A_i \leq 3, \\ A_i (A_i - 1) & \text{при } A_i > 3, (i = 1, 2). \end{cases} \quad (5)$$

После вычисления теплосодержаний слоев h_i путем интегрирования распределений температур по их толщине, согласно (3), составляются условия локального теплового баланса для каждого элементарного объема $h_i dS$:

$$q_i = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \epsilon_x \rho_x h_i \left[(T_{i0} - T_m) f(A_i) + (T_m - T_m(0)) \right] \right\} \quad (6)$$

где

$$f(A_i) = \begin{cases} (0,5 - 0,083 A_i) & \text{при } A_i \leq 3, \\ (A_i + 1)^{-1} & \text{при } A_i > 3. \end{cases} \quad (7)$$

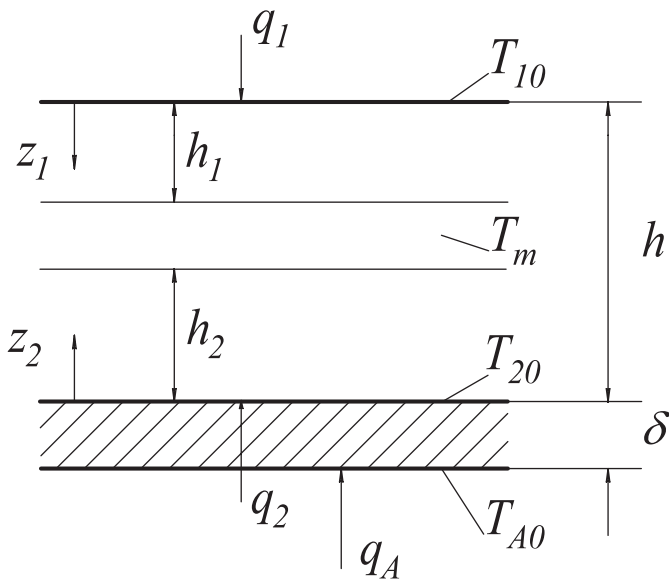


Рис. 3. Модель технологического блока одного ряда.

При выпечке хлеба происходит весьма сложный процесс одновременного нагрева теста, испарения из него влаги и спиртов, биохимических процессов. Все эти трудные для алгоритмизации явления необходимо учитывать при моделировании. В работе [5] предложен полуэмпирический метод учета всех этих процессов путем введения эффективной теплоемкости c_x , теплопроводности λ_x как функции срединной температуры изделия. В нашем случае этой температуре соответствует величина T_m . Проведенный нами анализ теплофизических характеристик хлеба установил, что температуропроводность изделий a_x практически не меняется. Таким образом, после аппроксимации зависимостей $\rho_x(T_m)$, $c_x(T_m)$ по ним и величине a_x находим $\lambda_x(T_m)$. Например, для теста из муки первого сорта [6]

$$\lg \rho_x = 3,51 - 0,43 \lg T_m; \quad \lg c_x = 3,1418 + 0,00694 T_m;$$

$$a_x = 2 \cdot 10^{-7}; \quad \lambda_x = a_x \rho_x c_x. \quad (8)$$

Здесь и ниже размерность всех величин соответствует стандарту СИ. Соответственно производные величин (8) будут:

$$\frac{\partial \rho_x}{\partial T_m} = -0,43 \frac{\rho_x}{T_m}, \quad \frac{\partial c_x}{\partial T_m} = 0,016 c_x,$$

$$\frac{\partial \lambda_x}{\partial T_m} = a_x \left(c_x \frac{\partial \rho_x}{\partial T_m} + \rho_x \frac{\partial c_x}{\partial T_m} \right). \quad (9)$$

После дифференцирования правой части (6) по времени t получаем систему уравнений, позволяющую решить задачу при заданных q_i ($i = 1, 2$). Как уже отмечалось выше, задача распадается на две подзадачи – а) до смыкания слоев h_i ($i = 1, 2$), когда T_m неизменна и соответствует начальному значению – $T_m(0)$; б) после соприкосновения слоев, когда $T_m(t)$ изменяется во времени. Система уравнений для решения задачи а) следующая:

$$\frac{\partial h_i}{\partial t} = \frac{\left(q_i - b_{3i} \frac{\partial T_{i0}}{\partial t} - b_{4i} \frac{\partial q_i}{\partial t} \right)}{b_{2i}} \quad (i = 1, 2),$$

$$\sum h_i \leq h,$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = 0. \quad (10)$$

После нарушения второго условия (10) происходит переход к задаче б):

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{b_{22} \left(q_1 - b_{31} \frac{\partial T_{10}}{\partial t} - b_{41} \frac{\partial q_1}{\partial t} \right) + b_{21} \left(q_2 - b_{32} \frac{\partial T_{20}}{\partial t} - b_{42} \frac{\partial q_2}{\partial t} \right)}{b_{22} b_{11} + b_{21} b_{12}},$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} = \frac{q_1 - b_{11} \frac{\partial T_m}{\partial t} - b_{31} \frac{\partial T_{10}}{\partial t} - b_{41} \frac{\partial q_1}{\partial t}}{b_{21}},$$

$$h_2 = h - h_1. \quad (11)$$

Здесь

$$\begin{aligned}
 b_{1i} &= a_{1i} \frac{\partial c_x}{\partial T_m} + a_{2i} \frac{\partial \rho_x}{\partial T_m} + a_{5i} - \\
 &- a_{6i} A_i \left(\frac{1}{\lambda_x} \frac{\partial \lambda_x}{\partial T_m} + \frac{1}{T_{i0} - T_m} \right), \\
 b_{2i} &= a_{3i} + a_{6i} \frac{A_i}{h_i}, \\
 b_{3i} &= a_{4i} - a_{6i} \frac{A_i}{T_{i0} - T_m}, \\
 b_{4i} &= a_{6i} \frac{A_i}{q_i}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

В свою очередь,

$$\begin{aligned}
 \varphi_i &= \begin{cases} 0,5 - 0,083 A_i & \text{при } A_i \leq 3, \\ (A_i - 1)^{-1} & \text{при } A_i > 3, \end{cases} \\
 f_i &= (T_{i0} - T_m) \varphi_i + T_m - T_m(0), \\
 a_{1i} &= \rho_x h_i f_i, \\
 a_{2i} &= c_x h_i f_i, \\
 a_{3i} &= c_x \rho_x f_i, \\
 a_{4i} &= c_x \rho_x h_i \varphi_i, \\
 a_{5i} &= -c_x \rho_x h_i (\varphi_i - 1), \\
 a_{6i} &= -c_x \rho_x h_i \begin{cases} 0,083 & \text{при } A_i \leq 3, \\ (A_i + 1)^{-2} & \text{при } A_i > 3. \end{cases}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Прежде чем приступить к решению представленных задач, необходимо проанализировать тепловые процессы, происходящие в формах технологического ряда. Формы изготавливаются из алюминиевого сплава, для которого характерно высокое значение теплопроводности по сравнению с тесто-хлебными изделиями. Ниже принимаем

$$\rho_A = 2,7 \cdot 10^3, \quad c_A = 760, \quad \lambda_A = 164, \quad \delta = 0,011. \tag{14}$$

Распределение температур в форме следующее:

$$\begin{aligned}
 \frac{T_A - T_{20}}{T_{A0} - T_{20}} &= 1 - B\kappa + (2B + C - 3)\kappa^2 - (B + C - 2)\kappa^3, \\
 B &= \frac{q_{2A} \delta}{\lambda_A (T_{A0} - T_{20})}, \quad C = \frac{q_2 \delta}{\lambda_A (T_{A0} - T_{20})}, \quad \kappa = \frac{z_A}{\delta}.
 \end{aligned} \tag{15}$$

Скорость нагрева определяется выражением

$$\frac{\partial T_{A0}}{\partial t} = \frac{2a_A}{h_A^2} (T_{A0} - T_{20})(2B + C - 3), \tag{16}$$

а энергетическое соотношение будет:

$$\begin{aligned}
 q_A &= \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho_A c_A \delta (T_{A0} - T_{20}) \times \right. \\
 &\times (0,5 - 0,083B + 0,083C) \left. \right] + \rho_A c_A \delta \frac{\partial T_{20}}{\partial t} + q_2.
 \end{aligned} \tag{17}$$

Расчеты согласно (14) – (17) показали, что при $q_A \sim 1 \text{ кВт/м}^2$ температурный фронт в алюминиевых формах с условной толщиной $\delta = 0,011 \text{ м}$ достигает границы “форма – тесто” за время меньше 1 с. Из-за высокой теплопроводности форм разность $(T_{A0} - T_{20})$ не превосходит нескольких сотых градуса. Поэтому в соотношении (17) следует учитывать только два последних слагаемых:

$$q_2 = q_A - \rho_A c_A \delta \frac{\partial T_{20}}{\partial t}, \tag{18}$$

где производная вычисляется согласно (5).

Краевые условия для задачи а):

$$h_i(0) = 0, \quad T_m = T_m(0), \quad T_{i0} = T_m(0); \quad q_i = q_i(t). \tag{19}$$

Согласно принятой технологии, $T_m(0) = 35 \text{ }^\circ\text{C}$. Переход к задаче б) определяется смыканием тепловых слоев h_i и $T_m > T_m(0)$. Конечные значения функций в задаче а) служат начальными условиями для задачи б).

Как уже отмечалось, рассмотренные выше задачи описывают внутренние процессы в тесте – хлебе. Для их замыкания необходимы сведения о плотностях тепловых потоков $q_A(x, y, t)$ и $q_1(x, y, t)$ по всей верхней и нижней поверхности для каждого из девяти технологических блоков. Значения этих величин устанавливаются в результате совместного пространственно-временного решения тепло-аэродинамической и представленных выше задач. Согласно гипотезе Рейнольдса, по вычисленному напряжению трения τ_i ($i = 1, A$) в каждом расчетном узле на верхней и нижней поверхности технологического блока находятся плотности теплового потока

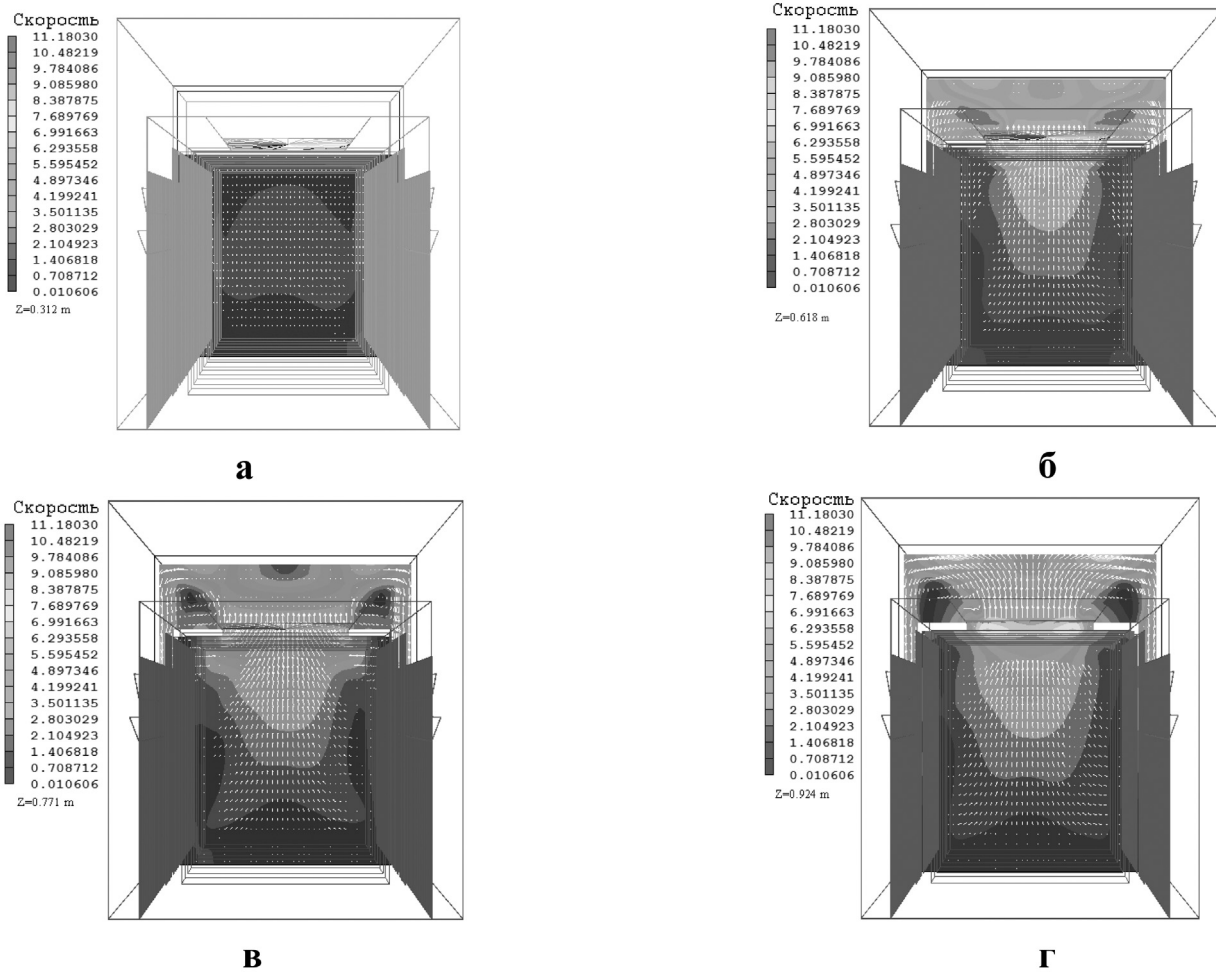


Рис. 4. Расчетные поля скоростей. Срезы по оси z, характерные точки:
 а) $z = 0,312$ м; б) $z = 0,618$ м; в) $z = 0,771$ м; г) $z = 0,924$ м.

$$q_i = \tau_i \frac{c_w (T_w - T_{i0})}{u_w} \quad (i = 1, A), \quad (20)$$

удовлетворяющие соответственно локальным температурам поверхностей T_{10} и T_{A0} по описанной здесь объединенной внутренней задаче. Величины с нижним индексом w соответствуют удельной теплоемкости, температуре и вектору скорости теплоносителя в первом пристеночном узле разностной сетки тепло-аэродинамической задачи. Совместное решение внешней и внутренней задачи возможно только при итерационной процедуре.

В постановочном плане внешняя задача такая же, как и описанная в работе [6]. Отличие состоит в замене подового распределения тестовых заготовок на блочное (см. рис.1 и 2). Представлен-

ное здесь решение аэродинамической задачи (рис. 4) выявило достаточно равномерное распределение скоростей в межблочном пространстве, что свидетельствует об удачной организации аэродинамических потоков в печи. Оценка величин q_A и q_1 , согласно (19), дала их значение порядка $2 \cdot 10^3$ Вт/м². Результаты численного решения внутренней задачи для хлеба из муки первого сорта представлены на рис. 5. Следует отметить, что происходит достаточно монотонное увеличение срединной температуры от 35 до 95 °С к концу выпечки, длительность которой составляет 45 минут. Благодаря отбору теплового потока формами, донная и боковая температуры хлеба в процессе выпечки ниже температуры корочки. Только к концу выпечки намечается их сближение. Энергетические затраты производства изделий в печи ГТП-135 не превышают 13,6 кВт.

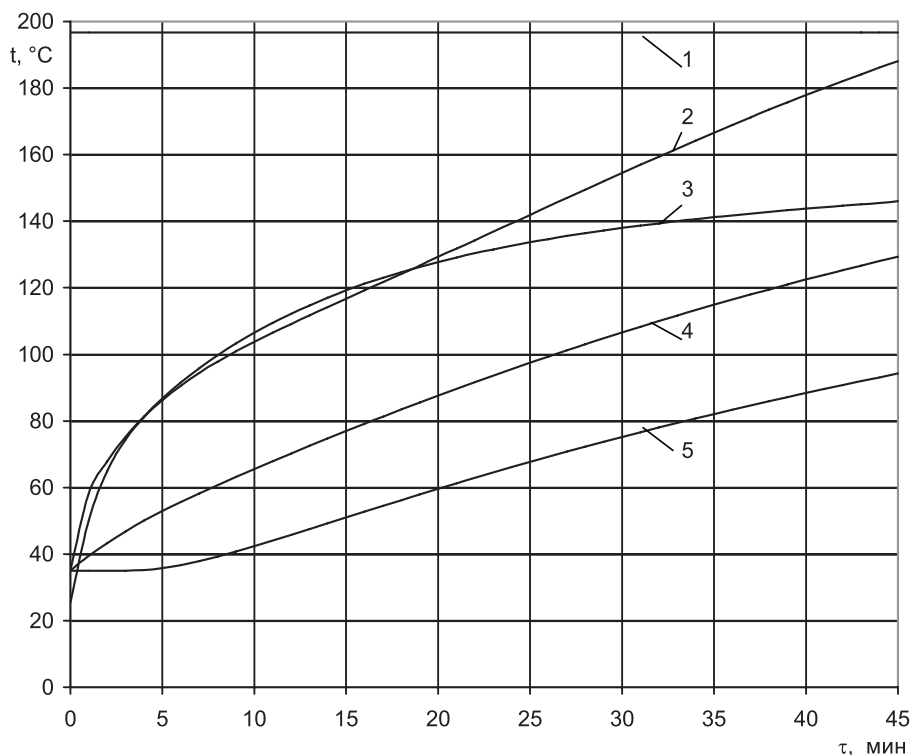


Рис. 5. Динамика выпечки формового хлеба.
 1 – $q_B, q_A, 10 \text{ Вт/м}^2$, 2 – $q_2, 10 \text{ Вт/м}^2$, 3 – $T_{10}, ^\circ\text{C}$, 4 – $T_{20}, ^\circ\text{C}$, 5 – $T_m, ^\circ\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

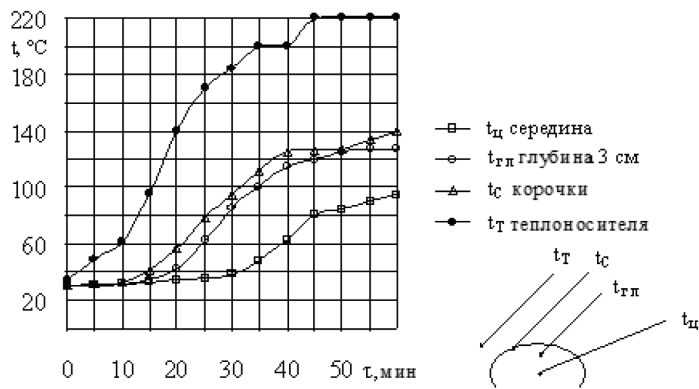


Рис. 6. Изменение температуры при выпечке подового хлеба из пшеничной муки первого сорта.

Вывод

Сопоставляя расчетные результаты с данными натурных измерений при выпечке подового хлеба (см. рис. 6), приходим к заключению, что, несмотря на различие инженерной организации подового и формового способов выпечки, их технологические температурные режимы близки.

1. *Накорчевский А.И.* Интегральный метод решения задач нестационарной теплопроводности (при внешней конвективной теплопередаче) // Промышленная теплотехника. – 1999. – Т. 21, №1. – С. 6–11.

2. *Накорчевский А.И.* Сопряженные задачи нестационарной теплопроводности при переменных внешних условиях // Инж.– физич. журнал. – 1999. – Т.72, №4. – С. 782-791.

3. *Накорчевский А.И.* Расчетные алгоритмы динамических и теплопереносных процессов с твердой дисперсной фазой // Технологические системы. – 2002. – №2. – С. 134-136.

4. *Накорчевский А.И.* Сопряженные задачи гидродинамики и нестационарной тепло- и массопроводности // Труды III Российской нац. конф. по теплообмену. – 2002. – Т.5. – С. 279 – 283.

5. *Лисовенко А.Т.* Процесс выпечки и тепловые режимы в современных хлебопекарных печах. – М.: Пищевая пром., 1976. – 216 с.

6. Басок Б.І., Накорчевський А.І., Новицька М.П., Петренко М.П., Хибина М.А. Дослідження теплоаеродинамічних процесів в робочому об'ємі гіротермічної печі типу ГТП-135 //

Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29, №1. – С. 60-69.

Получено 20.04.2007 г.

УДК 69.059.14:662.925

Розинський Д.Й.¹, Тимченко М.П.²,
Круковський П.Г.², Тадля О.Ю.²

¹НВП «Елетер»

²Інститут технічної теплофізики НАН України

ЕНЕРГООЩАДНА ТЕХНОЛОГІЯ

ЕЛЕКТРОТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ¹ В ЖКГ І АПК УКРАЇНИ

В статті наведено аналітичні відомості про енергозберігаючу технологію електротепlopостачання при впровадженні його в ЖКГ та АПК України. Наведені матеріали показують, що вже в 2005 році вартість акумуляційного електроопалення наближалась до вартості традиційних систем теплозабезпечення. В умовах підвищення цін на газ в 2006 році електроопалення стає ще більш привабливим.

В статье приведены аналитические сведения об энергосберегающей технологии электротеплообеспечения при внедрении его в ЖКХ и АПК Украины. Выкладки показывают, что уже в 2005 году стоимость аккумуляционного электроотопления приближалась к стоимости традиционных систем теплоснабжения. В условиях повышения цен на газ в 2006 году электроотопление становится еще более привлекательным.

We present analytical data on the energy-saving technology of electricity and heat supply at its introduction in housing and municipal services and the agrarian and industrial complex of Ukraine. Calculations show that, in 2005, the cost of accumulative electroheating came nearer to the cost of traditional systems of heat supply. Under conditions of increase in the gas prices in 2006, electroheating becomes even more attractive.

У березні 2006 р. Кабінетом міністрів України презентована “Енергетична стратегія України на період до 2030 року” (далі ЕСУ). Стратегія задає напрямки розробок та впровадження енергоефективних заходів реалізації в умовах дефіциту вуглеводневого палива конституційного права громадян України на повне, надійне, екологічне, задоволення їх потреб в кінцевих енергоносіях — електричною і тепловою енергією. Оскільки за прогнозом ЕСУ, очікується системне відставання темпів зростання цін на електричну енергію від цін на природний газ, то стає більш привабливим використання електричної енергії в теплотехнологіях у промисловості та побутовому теплозабезпеченні. Одним із напрямів ЕСУ є розвиток електротеплоакумуляційного (ЕТА)

споживання. Крім електрокабельних систем опалення (рис. 1.), електроенергія для цілей обігріву може використовуватися у системах опалення на базі теплонасосних установок (ТНУ), теплоакумуляційних печей, установок кавітаційного нагріву, а також приладах електроопалення прямої дії, наприклад, конвективних і променевих радіаторів.

Також перспективним є питання оптимізації електроопалення шляхом гібридизації різних систем опалення. В ЕСУ прогнозується, що заміна газових котелень на електричні теплогенератори та акумуляційний електричний нагрів може забезпечити витіснення до 75 % природного газу, що використовується для тепlopостачання у промисловості і побуті.

¹Під електротеплозабезпеченням розуміється теплозабезпечення шляхом трансформації електричної енергії у теплову, за допомогою головним чином електрокабельних систем обігріву (ЕКСО) теплоакумуляційної дії.