

Профессор Ю. И. Шишацкий, доцент С. В. Лавров, аспирант Е.И. Голубятников, инженер С.М. Замаев (Воронеж. гос. ун-т технол.) кафедра промышленной энергетики, тел. (473) 255-44-66

## Теоретическое и экспериментальное обоснование целесообразности сушки дисперсных материалов при осциллирующем теплоподводе

Теоретически и экспериментально обосновано обезвоживание капиллярно-пористых тел в псевдооживленном слое при осциллирующем теплоподводе.

Theoretically and experimentally substantiated dehydration capillary porous bodies in a fluidized bed under oscillating heat supply.

Ключевые слова: дисперсные материалы, сушка, осциллирование.

В [1] построена модель процесса конвективной сушки капиллярно-пористых тел в режиме осциллирования.

Окончательная формулировка математической модели конвективной сушки капиллярно-пористого тела при осциллирующем режиме изменения температуры сушильного агента:

$$\frac{\partial U}{\partial Fo} = Lu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) + LuPn \left( \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) + LuPn_p \left( \frac{\partial^2 P}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial R} \right),$$

$$\frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{FeLu}{Pn} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) + (1 + FeLu) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{FaLuPn_p}{Pn} \left( \frac{\partial^2 P}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial R} \right),$$

$$\frac{\partial P}{\partial Fo} = -\varepsilon Lu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) - \varepsilon LuPn_p \left( \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) + (Lu_p - \varepsilon LuPn_p) \left( \frac{\partial^2 P}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial R} \right),$$

начальные условия

$$U(R,0) = T(R,0) = P(R,0) = 0,$$

условия осесимметричности

$$\frac{\partial U(0, Fo)}{\partial R} = \frac{\partial T(0, Fo)}{\partial R} = \frac{\partial P(0, Fo)}{\partial R} = 0,$$

условия на внешней границе

$$\frac{\partial U(1, Fo)}{\partial R} + Pn \frac{\partial T(1, Fo)}{\partial R} + Pn_p \frac{\partial P(1, Fo)}{\partial R} + Bi_m [U(1, Fo) - 1] = 0, \\ - \frac{\partial T(1, Fo)}{\partial R} + Bi_q [\hat{O}(Fo) - T(1, Fo)] - (1 - \varepsilon) Bi_m KoLu [U(1, Fo) - 1] = 0,$$

$$P(1, Fo) = 0;$$

$$\hat{O}(Fo) = B + A \cos(CFo);$$

$$A = \frac{1}{2} (1 - t_0 / t_c),$$

$$B = \frac{1}{2} (1 + t_0 / t_c),$$

$$C = 2\pi r_0^2 / (T_0 a_q),$$

где  $U$  – влагосодержание, кг влаги/кг сухого вещества;  $P$  – давление влажного воздуха в капиллярно-пористом теле, Па;  $t$  – температура, К;  $t_0$  – начальная температура материала, К;  $t_c$  – температура окружающей среды, К;  $a_q$  – коэффициент температуропроводности материала,  $m^2/c$ ;  $r$  – координата, м;  $r_0$  – эффективный радиус капиллярно-пористого тела, м;  $\varepsilon$  – коэффициент диффузии паровообразной влаги во влажном теле,  $m^2/c$ ;  $Lu$  – критерий Лыкова;  $Pn$  – критерий Поснова;  $Pn_p$  – фильтрационный критерий Поснова;  $Fe$  – критерий Фёдорова;  $Fo$  – теплопроводный критерий Фурье;  $Bi_q$  – теплообменный критерий Био;  $Bi_m$  – массообменный критерий Био;  $\hat{E}i$  – критерий Коссовича.

Нами выбрано численное интегрирование уравнений математической модели, основанное на конечно-разностных представлениях.

Ниже проанализированы графические зависимости, отражающие специфику сушки хлебопекарных дрожжей в псевдооживленном слое (рис. 1) и с осциллирующим теплоподводом (рис. 2).

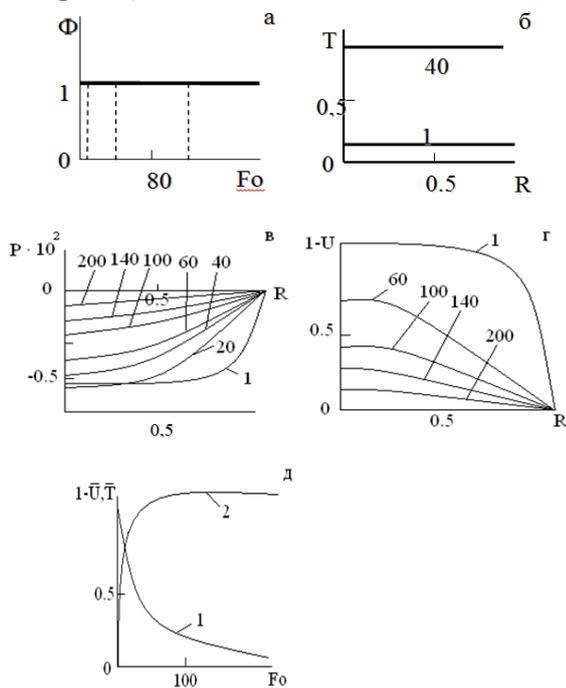


Рис. 1. Конвективная сушка капиллярно-пористого тела без осциллирования температуры сушильного агента при различных числах  $Fo$ :  $a$  – закон изменения температуры сушильного агента  $\Phi=1$ ;  $b$  – поле температур;  $в$  – поле давления;  $г$  – поле влагосодержания;  $д$  – интегральная характеристика процесса ( $\bar{U}, \bar{T}$  – средние по объему влагосодержание и температура)

Вначале была проведена серия экспериментов при постоянной температуре подаваемого сушильного агента (рис. 1,  $a$ ). При этом, как видно из рис. 1,  $б$ , прогрев частиц практически достигает температуры сушильного агента уже при  $Fo \approx 40$ . Среднеинтегральная величина влагосодержания достигает величины  $\approx 0,42$  (рис. 1,  $д$ ). Дальнейшее проведение процесса нецелесообразно из-за перегрева дрожжей.

Из рис. 1,  $в$  следует, что на всем протяжении процесса создается антиградиент по фильтрационной составляющей паровообразной влаги, препятствующий ее переносу к поверхности межфазного влагообмена (рис. 1,  $г$ ). Результаты вычислительного эксперимента в этом случае показывают, что проведение процесса сушки при постоянной температуре сушильного агента может снизить качественные показатели готовой продукции. Поэтому вычислительные эксперименты были продолжены с целью теоретического подтверждения эффективности осциллирующего закона изменения температуры сушильного агента в процессе. Такие вычислительные эксперименты имеют над собой физическую базу – из-за конечной скорости релаксации температурного поля капиллярно-пористого тела возможно подобрать такую частоту осциллирования, которая не приведет к нежелательному перегреву материала.

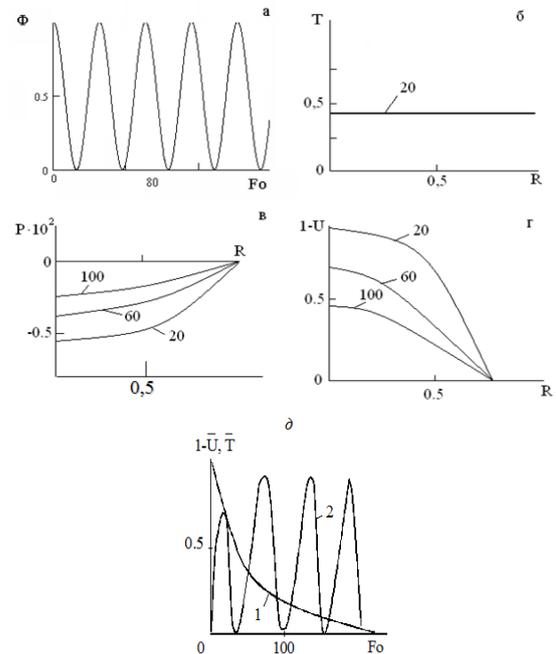


Рис. 2. Конвективная сушка капиллярно-пористого тела с осциллированием температуры сушильного агента при различных числах  $Fo$ :  $a$  – закон изменения температуры сушильного агента;  $б$  – поле температур;  $в$  – поле давления;  $г$  – поле влагосодержания;  $д$  – интегральная характеристика процесса ( $\bar{U}, \bar{T}$  – средние по объему влагосодержание и температура)

На рис. 2 показаны результаты вычислительного эксперимента, когда частота осциллирования невелика:

$$\Phi(Fo) = \frac{1}{2} [1 + \cos(0,1 \cdot Fo)].$$

Характер изменения полей температуры (рис. 2, б), давления (рис. 2, в), влагосодержания (рис. 2, з), кривой сушки (рис. 2, д) остался прежним, но среднеинтегральная температура (рис. 2, д; кривая 2) уже не достигает температуры сушильного агента на всем протяжении процесса. Таким образом, означенная выше гипотеза подтверждается, то есть возможно управление температурным режимом термобильного капиллярно-пористого тела.

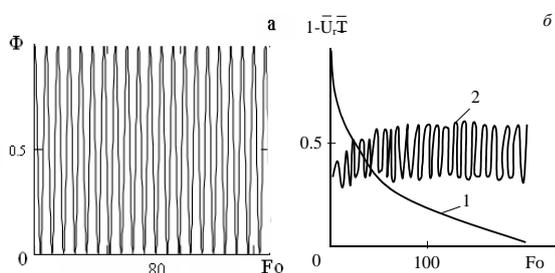


Рис. 3. Кинетика конвективной сушки капиллярно-пористого тела с осциллированием температуры сушильного агента: а – закон осциллирования; б – 1 – кривая сушки; 2 – средняя температура

Следующая схема вычислительных экспериментов была ориентирована на поиск оптимального режима частоты осциллирования. На рис. 3, а показан закон осциллирования, удовлетворяющий формуле

$$\Phi(Fo) = \frac{1}{2} [1 + \cos(0,8 \cdot Fo)].$$

Следует отметить, что диапазон изменения при этом существенно сократился, хотя с увеличением  $Fo$  тенденция возрастания остается. Кроме того, по сравнению, когда  $\Phi = 1$ , в первом периоде сушки ( $Fo \leq 20$ ) съём влаги в оптимальном режиме осциллирования выше примерно на 10 %.

Аналогичные результаты получены при сушке свекловичного жома в псевдооживленном слое при осциллирующем теплоподводе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шишацкий, Ю.И. Сушка хлебопекарных дрожжей в псевдооживленном слое при осциллирующем теплоподводе [Текст]: монография / Ю.И. Шишацкий, Г.В. Агафонов, С.М. Замаев, С.В. Лавров.- М.: Пищевая промышленность, 2009.- 162 с.