

Термовлагопроводность свекловичного жома и других коллоидных капиллярнопористых материалов

С. Л. ЯРОВОЙ, А. Ф. ЗАБОРСИН канд. техн. наук, ВНИИ сах. пром-сти,
Ю. П. ЛУЦИК, А. Ф. БУЛЯНДРА д-р техн. наук, Киев. технол. ин-т пищ. пром-сти

Большинство влажных пищевых продуктов относятся к коллоидным капиллярнопористым телам, при термообработке которых явления внутреннего тепло- и влагопереноса тесно связаны между собой. Совместное рассмотрение этих явлений необходимо при исследовании кинетики и динамики процесса сушки, а также при аналитическом описании внутреннего теплопереноса при высокоинтенсивных методах энергоподвода.

Для практического использования аналитических решений, а также понимания механизма переноса тепла и влаги необходимо знание численных значений коэффициентов теплопереноса и характер их зависимости от основных параметров влажного материала.

Закон неизотермического переноса влаги для одномерного случая выражается формулой [1]:

$$J = -a_m \gamma_0 \left(\frac{dU}{dx} + \delta \frac{dT}{dx} \right), \quad (1)$$

где J — плотность потока влаги, кг ($\text{м}^2 \cdot \text{с}$); a_m — коэффициент диффузии влаги, $\text{м}^2/\text{см}$; γ_0 — плотность сухого вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$; δ — термоградиентный коэффициент, К^{-1} ; $\frac{dU}{dx}$ и $\frac{dT}{dx}$ — соответственно градиенты влажности и температуры.

При отсутствии влагопереноса и предельно малом перепаде температуры, если не происходит испарение влаги, из формулы (1) коэффициент δ равен

$$\delta = -\frac{dU}{dT}. \quad (2)$$

Дифференциальные уравнения переноса тепла и влаги для одномерного случая имеют вид

$$\frac{dT}{d\tau} = a \frac{d^2 T}{dx^2} + \varepsilon \frac{r}{c} \frac{dU}{d\tau}; \quad (3)$$

$$\frac{dU}{d\tau} = a_m \frac{d^2 U}{dx^2} + a_m \delta \frac{d^2 T}{dx^2}, \quad (4)$$

где a — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; ε — критерий фазового превращения ($0 < \varepsilon < 1$); r — удельная теплота испарения, $\text{Дж}/\text{кг}$; c — удельная теплоемкость материала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Из формул (3) и (4) вытекает, что стационарному состоянию соответствует линейное распределение температуры и влагосодержания вдоль образца материала.

Объектами исследования взяты связнодисперсные материалы, отличающиеся между собой коллоидно-физическими свойствами. Исходная плотность влажных материалов равна: свекловичный жом — $600 \text{ кг}/\text{м}^3$, мука макаронная высшего сорта — 675 , макаронное тесто из этой же муки (не вальированное) — 985 , крахмал картофельный — $750 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Исследования по термовлагопроводности свекловичного жома проводились ранее [2]. Коэффициент δ определялся стационарным методом при условиях $t_{\text{гор}} = 70^\circ \text{С}$, $t_{\text{хол}} = 14^\circ \text{С}$. Влагосодержание жома изменялось от 10 до 350%. Плотность укладки жома в цилиндрах была 400—500 $\text{кг}/\text{м}^3$ в зависимости от влажности.

В настоящее время возникла необходимость уточнить данные, описанные в литературе [2] и провести исследования в более широком диапазоне влагосодержаний ($U = 5 \div 850\%$) и с большим количеством цилиндров. С целью получения достоверных данных в два цилиндра загружался образец с одинаковым начальным влагосодержа-

нием и плотностью, что позволило из одного опыта получать 5—7 пар экспериментальных точек.

Стационарный поток тепла через исследуемые образцы обеспечивался поддержанием постоянных температур на концах цилиндров: горячей — от ультратермостата; холодной — от водопроводной сети.

Во избежание потерь влаги при нагревании поверхность торцов цилиндров (толщина стенки цилиндра — 10 мм) смазывалась термостойкой влагоизоляцией и покрывалась алюминиевой фольгой.

Распределение температуры в материале по высоте цилиндра контролировалось с помощью пяти термопар на расстоянии 10 мм по оси симметрии.

Стационарное распределение температуры по высоте цилиндра в каждом опыте, с конкретным пищевым материалом, наступало в разное время и находилось в пределах от 8—10 до 18—22 ч.

Исследованиями установлено, что линейное распределение влагосодержания наступает значительно позже, что объясняется большей инерционностью поля влагосодержания по сравнению с инерционностью температурного поля. В связи с этим, опыты длились до 30—34 ч, после чего определяли влагосодержание образца по слоям методом высушивания их до постоянной массы.

На рис. 1 представлено распределение температуры и влагосодержания по высоте цилиндра с образцом свекловичного жома, из которого видно, что их распределение (при данном U_H образцов) можно считать линейными.

При исследовании зависимости термоградиентного коэффициента от влагосодержания пищевых продуктов установлено, что характер изменения кривых $\delta(U)T$ различен и зависит от микропористой структуры, вида внутреннего влагопереноса и форм связи влаги в них.

Как известно [1], для коллоидно-капиллярно-пористых тел, к которым относится свекловичный жом, термовлагопроводность обусловлена относительной термодиффузией пара и воздуха, термодиффузией пара и жидкости и капиллярной термовлагопроводностью. Влажные коллоидные тела (крахмал, макаронная мука и тесто из нее) состоят из однородных мицелл, образующих разветвленную систему микропор. Расстояние между мицеллами сравнимо с размерами молекул, поэтому перенос влаги в таких системах определяется молекулярным течением влаги в микропорах [3, 4].

Характер изменения кривых $\delta(U)T$, представленных на рис. 2, можно объяснить следующим образом. В области низкого влагосодержания исследуемых материалов, где влага связана адсорбционными силами, происходит перераспределение концентрации влаги путем эффузии пара. В этом случае потенциалом эффузионного

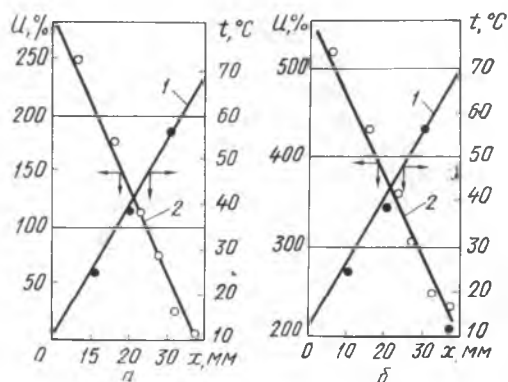


Рис. 1. Распределение температуры (t) (кривые 1) и влагосодержания (U) (кривые 2) по высоте образца (x) при различном начальном влагосодержании жома:
а — $U_H = 56,93\%$; б — $U_H = 244,82\%$.

переноса пара является отношение P/\sqrt{T} (где P — парциальное давление пара, T — абсолютная температура). При этом в исследуемых образцах при малых значениях температуры P также принимает меньшие значения. В связи с этим происходит эффузия пара от более холодных мест к нагретым без конденсации. Количество тепла, перенесенное таким образом, незначительно и прогрев материалов при низких влагосодержаниях осуществляется благодаря их теплопроводности.

С повышением влагосодержания и температуры материалов по высоте цилиндров влияние парциального давления пара на массоперенос становится больше, чем влияние величины \sqrt{T} . Для коллоидных капиллярнопористых тел это приводит к эффузии пара по направлению потока тепла с последующей конденсацией в холодных частях материалов. При этом для образцов свекловичного жома значительные размеры пор способствуют не только эффузии пара, но и пе-

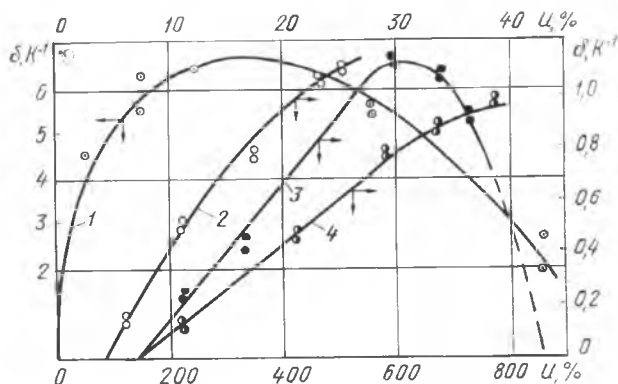


Рис. 2. Зависимость термоградиентного коэффициента (δ) от влагосодержания (U):

1 — свекловичный жом, $\gamma_0 = 660 \text{ кг/м}^3$; 2 — макаронная мука высшего сорта, $\gamma_0 = 673 \text{ кг/м}^3$; 3 — макаронное тесто высшего сорта (не прессованное), $\gamma_0 = 985 \text{ кг/м}^3$; 4 — крахмал картофельный, $\gamma_0 = 650 \text{ кг/м}^3$.

реносу жидкообразной влаги за счет капиллярной термовлагопроводности по направлению потока тепла. Это также вызвано избыточным давлением заземленного воздуха вследствие расширения его в нагретых местах.

Для различных материалов максимальные значения коэффициентов δ достигаются при различных значениях U . Особенно резкий рост кривой до максимального значения наблюдается для свекловичного жома (см. рис. 2, кривая 1). Это свидетельствует о том, что в данном диапазоне U на внутренний массоперенос значительно влияет миграция влаги. Экстремальная точка на кривых дает примерную границу между адсорбционно-связанной и капиллярной влагой, поскольку при термодиффузии жидкости и адсорбционно-связанной влаге коэффициент δ увеличивается с повышением U материалов.

Увеличение U свекловичного жома приводит к постепенному набуханию и закупорке пор влагой, в том числе и сконденсированной. Дальнейший перенос свободной влаги в основном происходит посредством избирательной диффузии.

Термоградиентный коэффициент избирательной термодиффузии очень мал и с увеличением U жом кривая 1 стремится к нулю.

Увеличение влагосодержания коллоидных тел сопровождается капиллярной конденсацией пара. Убывание коэффициента δ для этих материалов объясняется уменьшением доли переноса парообразной влаги в общем ее потоке.

Полученные данные могут быть использованы для уточнения расчетов, интенсификации и выбора оптимальных параметров процессов сушки пищевых продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. — М.: Госэнергоиздат, 1956. — 464 с.
2. Парфенопуло М. Г. Термовлагопроводность свекловичного жома. — Изв. вузов. Пищ. технология, 1966, № 6, с. 93—96.
3. Сизякова Е. И. Исследование кинетики термовлагопроводности в капиллярнопористых телах. — Тр. МТИПП, 1956, вып. 6, с. 34—47.
4. Лыков А. В., Ауэрман Л. Я. Теория сушки капиллярнопористых коллоидных материалов пищевой промышленности. — М.: Пищепромиздат, 1946. — 288 с.