

Комплексные измерения теплофизических характеристик влагосодержащих материалов при замораживании и размораживании

И.В. БАРАНОВ, А.А. НИКИТИН
СПбГУНиИТ

The article presents a description and principle of operation of the automated device developed at the chair of physics of SPbGUNIIT, intended for complex determination of thermophysical characteristics of the materials in the field of phase transitions. According to the obtained thermograms and presented relationships, heat capacities, temperature conductivities and heat conductivities of the studied materials (here - ground meat during defrosting) are calculated.

Большинство пищевых продуктов, грунтов и дисперсных материалов включают в себя влагу. Известно, что удельная теплоемкость чистой воды [4,19 кДж/(кг·К)] почти в 2 раза превышает удельную теплоемкость льда [2,10 кДж/(кг·К)], а коэффициент теплопроводности льда [2,21 Вт/(м·К)] в 4 раза больше, чем у воды [0,554 Вт/(м·К)]. Поэтому теплофизические характеристики (ТФХ) пищевых продуктов и влагосодержащих материалов значительно изменяются при замораживании и являются функциями температуры.

Льдообразование относится к фазовым переходам первого рода, которые сопровождаются скачкообразным изменением энтропии и теплоемкости. По этой причине зависимость теплоемкости от температуры имеет пик (или пики), абсцисса вершины которого соответствует криоскопической температуре $t_{кр}$, а площадь под пиком отражает скрытую теплоту фазового перехода. В области



Рис. 1. Схема автоматизированной установки для измерения ТФХ в области фазовых переходов

фазовых превращений ТФХ могут изучаться только экспериментально.

На кафедре физики СПбГУНиПТ был разработан автоматизированный прибор для комплексного определения ТФХ материалов в области фазовых превращений. Предлагаемый прибор основывается на методах монотонного разогрева исследуемого образца.

На рис. 1 представлена структурная схема автоматизированной установки для комплексных измерений ТФХ в области фазовых переходов. В состав установки входят: тепловая ячейка, контроллер и персональный компьютер.

Контроллер включает модуль сбора информации и управления; основной вычислитель; блок питания.

Модуль сбора информации и управления выполняет следующие функции: сбор первичной информации с термодатчиков; преобразование аналоговых сигналов в цифровой шестнадцатеричный код; управление двумя нагревателями. Этот модуль состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП), коммутатора, блока управления нагревателями. Основным электроизмерительным узлом контроллера является 16-разрядный АЦП с предварительным усилителем, позволяющий регистрировать показания различных электрических датчиков с пороговой чувствительностью не ниже 10 мкВ, при общем диапазоне изменения регистрируемых сигналов $\pm(15 \dots 20)$ мВ. Коммутатор реализует опрос трех электрических датчиков, причем периодичность (шаг) опроса может изменяться оператором в очень широких пределах (от 0,1 с до нескольких минут).

Основной вычислитель включает жидкокристаллический дисплей (ЖКИ), сетевой модуль «Ethernet 10BASE-T» и блок «RS-232». Функциями основного вычислителя являются: обработка первичной информации; вывод информации в реальном времени на жидкокристаллический дисплей; организация связи контроллера с базовым компьютером; обработка команд оператора. На жидкокристаллическом дисплее высвечиваются командные

меню и отображаются в реальном времени графики изменения показаний нескольких датчиков, что позволяет оператору визуально следить за ходом опыта. Модуль «Ethernet 10BASE-T» поддерживает связь контроллера с базовым компьютером по локальной сети. Блок «RS-232» предназначен для установки программного обеспечения с персонального компьютера по последовательному порту.

В контроллере имеется *стабилизированный источник напряжения*, нормализующий питание его основных узлов и обеспечивающий воспроизводимую работу внешних электронагревателей мощностью до 10 Вт.

На рис. 2 показана упрощенная схема несимметричной тепловой ячейки плоского калориметра. Основу ячейки образуют два массивных металлических блока: неподвижный нижний блок 1 и подвижный (съемный) верхний блок 4. Исследуемый материал помещается в специальную кювету 7 [кольцо толщиной 1,5 мм, диаметром 60 мм и высотой 14 мм, выполненное из полиметилметакрилата (оргстекло) с двумя плотными дюралевыми

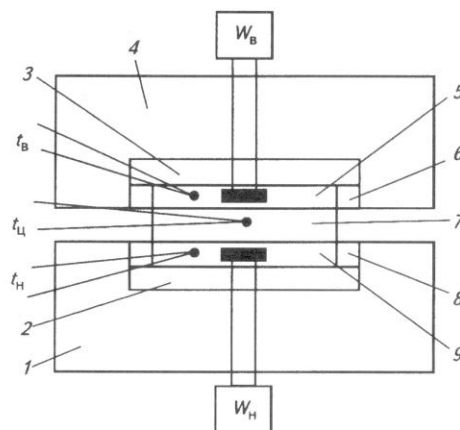


Рис. 2. Схема тепловой ячейки плоского калориметра: 1 — неподвижный блок; 2, 3, 6, 8 — теплоизоляция; 4 — съемный верхний блок; 5, 9 — нагревательные элементы; 7 — кювета; W_v и W_n — мощность нагревателей

крышками по сторонам кольца]. В центре кюветы сделан специальный канал для температурного датчика. В верхний и нижний блоки 1, 4 установлены нагревательные элементы 5 и 9 с вмонтированными температурными датчиками для регистрации температуры верхнего (t_v) и нижнего (t_n) нагревателей. Нагреватели изолированы от блоков при помощи теплоизоляции (пенополиуретана) 2, 3, 6, 8.

Перед началом проведения опыта тепловая ячейка с исследуемым материалом устанавливается в холодильную камеру с температурой t_0 . Оператор при помощи контроллера задает мощности верхнего и нижнего нагревателей, длительность опыта и шаг опроса температурных датчиков. После достижения тепловой ячейкой с исследуемым веществом температуры t_0 контроллер автоматически подает питание на нагреватели. В процессе опыта контроллер записывает показания по времени трех температурных датчиков: $t_v(\tau)$ (верхняя грань образца), $t_n(\tau)$ (нижняя грань образца) и $t_{ц}(\tau)$ (центр образца).

После окончания опыта информация в виде текстового файла передается на ПК. В качестве примера на рис. 3 изображен график, отражающий показания температурных датчиков при размораживании говяжьего фарша. На кривой $t_{ц}(\tau)$ четко выражен фазовый переход, связанный с размораживанием воды в образце. Полученные экспериментальные термограммы обрабатываются на персональном компьютере в программных оболочках Microsoft Excel, Mathcad и Origin 6.1.

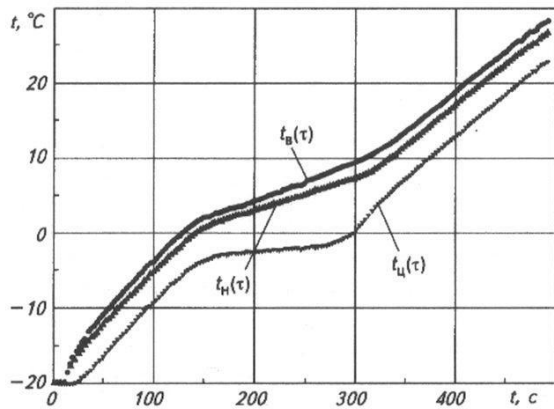


Рис. 3. Пример экспериментальных термограмм, снятых при размораживании мясного фарша

Для расчета удельной теплоемкости исследуемых материалов используется следующая расчетная формула:

$$c(t) = \frac{1}{m} \left[\frac{W_v(\tau) + W_n(\tau) - C_v(t)b_v(t)}{b_v(t)} - \frac{C_n(t)b_n(t) - C_{кв}(t)b_v(t) - C_{кн}(t)b_n(t)}{b_v(t)} - \frac{K_v(\vartheta)\vartheta_v(\tau) + K_n(\vartheta)\vartheta_n(\tau) + C_k(t)b_v(t) - \alpha S_{бок}\vartheta}{b_v(t)} \right], \quad (1)$$

где $c(t)$ — удельная теплоемкость исследуемого вещества, Дж/(кг·К);

m — масса вещества, кг;

$C_v(t)$, $C_n(t)$ — полные теплоемкости верхнего и нижнего нагревателей соответственно, Дж/К;

$C_{кв}(t)$, $C_{кн}(t)$ — полные теплоемкости верхней и нижней крышек кюветы, Дж/К;

$b_v(t)$, $b_n(t)$ — скорости разогрева верхнего и нижнего нагревателей, К/с;

$b_v(t)$ — среднеобъемная скорость разогрева образца, К/с;

$K_v(\vartheta)$, $K_n(\vartheta)$ — проводимость изоляции верхнего и нижнего нагревателей соответственно, Вт/К;

$\vartheta_v(\tau)$, $\vartheta_n(\tau)$ — разность температур нагревателей и соответствующих блоков, К;

α — коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности кюветы, Вт/(м²·К);

$S_{бок}$ — площадь боковой поверхности кюветы, м².

Коэффициент теплопроводности рассчитывается по следующей зависимости:

$$\lambda(t) = \frac{h}{2S} \left[\frac{W_v(\tau) - W_n(\tau) - C_v(t)b_v(t)}{\vartheta_v(\tau) - \vartheta_n(\tau)} + \frac{C_n(t)b_n(t) - C_{кв}(t)b_v(t) + C_{кн}(t)b_n(t)}{\vartheta_v(\tau) - \vartheta_n(\tau)} - \frac{K_v(\vartheta)\vartheta_v(\tau) - K_n(\vartheta)\vartheta_n(\tau)}{\vartheta_v(\tau) - \vartheta_n(\tau)} \right], \quad (2)$$

где h — высота кюветы, м;

S — площадь поперечного сечения кюветы, м².

Коэффициент температуропроводности вычисляется как

$$a(t) = \frac{b_v(t)h^2}{\vartheta_v(\tau) + \vartheta_n(\tau)}. \quad (3)$$

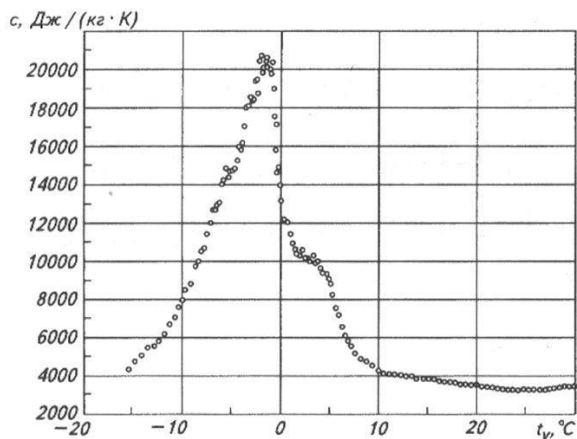


Рис. 4. Изменение удельной теплоемкости говяжьего фарша при размораживании, рассчитанное по результатам эксперимента

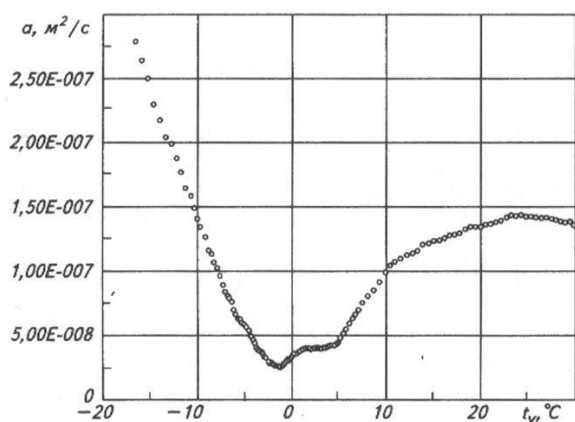


Рис. 5. Изменение коэффициента температуропроводности фарша при размораживании

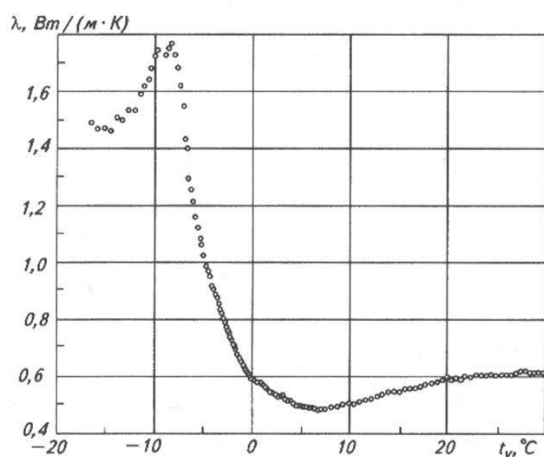


Рис. 6. Изменение коэффициента теплопроводности фарша при размораживании

Коэффициенты $C_v(t)$, $C_n(t)$, $K_v(\vartheta)$, $K_n(\vartheta)$, являющиеся константами калориметрической ячейки, определялись в градуировочных опытах на образцовых веществах (дистиллированная вода, кварц, полиметилметакрилат). Обработка результатов опытов позволила получить следующие расчетные зависимости для констант тепловой ячейки:

$$C_v(t) = 15,2 + 0,059 t_v; \quad (4)$$

$$C_n(t) = 12,4 + 0,0657 t_n;$$

$$K_v(\vartheta) = 0,0223 + 7,63 \cdot 10^{-5} \vartheta_v; \quad (5)$$

$$K_n(\vartheta) = 0,0211 + 2,53 \cdot 10^{-5} \vartheta_n.$$

Погрешность аппроксимаций для данных зависимостей составила 0,7 %.

На рис. 4 – 6 представлены зависимости удельной теплоемкости, коэффициента температуропроводности и коэффициента теплопроводности от среднеобъемной температуры t_v в области фазового перехода для говяжьего фарша.

На рис. 4 и 5 хорошо видна область фазового перехода с криоскопической температурой $-1,9$ °C. Зная площадь под кривой удельной теплоемкости, программная оболочка Origin 6.1 позволяет рассчитать скрытую теплоту плавления и количество влаги, содержащейся в продукте. На рис. 6 хорошо видно, что коэффициент теплопроводности резко меняется с $1,5$ Вт/(м·К) в замороженном состоянии, до $0,6$ Вт/(м·К) в размороженном.

С помощью данного метода были исследованы ТФХ в области фазовых переходов для песка различного влагосодержания и ряда пищевых продуктов (картофель, творог и др.). Получены температурные кривые для ТФХ для данных материалов, криоскопические температуры и скрытые теплоты плавления.

Список литературы

1. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. — М.: Гостехиздат, 1954.
2. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. — М.; Л.: Машгиз, 1957.
3. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. — Л.: Энергия, 1973.
4. Теплофизические измерения и приборы/ Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров; Под общ. ред. Е.С. Платунова. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986.