

$$\lambda = \left(0,5782313 \cdot P - 0,002217345 \cdot T^2 + 0,4395512 \cdot T + 1410524 \right) \cdot 10^{-3} \quad (50)$$

Выводы.

1. Для надежного расчета термодинамических параметров и теплофизических свойств рабочего тела АХА можно использовать соотношения авторов [8-10].

2. Недостаточные соотношения были получены путем аппроксимации табличных данных по термодинамическим параметрам и теплофизическим свойствам рабочего тела АХА.

3. Все приведенные соотношения позволяют с достаточной точностью проводить инженерные расчеты циклов АХА и элементов АХА.

Поступила 11.2010

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тітлов О.С. Науково-технічні основи створення енергозберігаючих побутових абсорбційних холодильних приладів / О.С. Тітлов, М.Д. Захаров // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2009. – № 35. – Т.1. – С. 113-127.
2. Заторский А.А. Алгоритм расчета параметров узловых точек циклов абсорбционных водоаммиачных холодильных машин // Химическое и нефтяное машиностроение – 1978. – № 8. – С. 18-19.
3. Manuel Conde-Petit. Thermophysical Properties of $\{NH_3 + H_2O\}$ mixtures for the industrial design of absorption refrigeration equipment // Zurich : M.CONDE ENGINEERING, 2006. – 38 p.
4. Богданов С.Н., Иванов О.П., Куприянова А.В. Холодильная техника. Свойства веществ. Справочник. Изд. 3-е, перераб. и доп., М.: Агропромиздат, 1985. – 208 с.
5. Богданов С.Н., Бурцев С.И., Иванов О.П., Куприянова А.В. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ./Под ред. С.Н.Богданова. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГАХПТ, 1999. – 320 с.
6. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
7. Іщенко І. М. Моделювання і аналіз циклів абсорбційних водоаміачних холодильних машин / І.М. Іщенко, О.С. Тітлов // Наукові праці ОНАХТ. – 2009. – № 36. – Т.2. – С. 263-266.
8. Иванов О.П., Мамченко В.О. Уравнение для нахождения теплофизических свойств воды и некоторых хладагентов в зависимости от температуры // Холодильная техника. – 1977. – № 3. – С. 32-33.
9. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. - Изд. 3-е, перераб. и доп. – Л.: Химия., 1982. – 592 с.
10. Осипов Ю.В., Третьяков Н.П., Некрасов Н.Н Тепло - и массообмен при абсорбции аммиака водоаммиачным раствором из водородоаммиачной смеси. // Холодильная техника. – 1971. – № 9. – С. 47-50.

УДК 663.93

КОЗОНОВ Т.В., начальник производства фирмы «UkrCoffee», Ильичевск, Одесская область
КОЗОНОВА Ю.А., ассистент, канд. техн. наук, ТИТЛОВ А.С., доцент, д-р техн. наук
 Одесская государственная академия пищевых технологий

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОФЕ

Представлены результаты теплофизических исследований основных свойств кофе: плотности, теплопроводности и теплоемкости методом экспериментальных исследований

Ключевые слова: кофе, теплофизические исследования, теплопроводность, теплоемкость

The results of thermophysical researches of basic properties of coffee are presented: to the closeness, heat conductivity and heat capacity by the method of experimental researches

Keywords: coffee, thermophysical researches, heat conductivity, heat capacity

На предприятии по производству кофе «UkrCoffee» проводится проектирование системы кондиционирования воздуха (СКВ) для поддержания требуемых параметров воздушной среды в производственных и складских помещениях.

Для проектирования СКВ необходима информация о теплопритоках в обрабатываемое помещение, в том числе и о теплопритоках, вносимых продуктами и сырьем [1], в частности с необжаренными зёрнами кофе.

Проведенный анализ научно-технической литературы и интернет-ресурсов [2, 3], показал полное отсутствие справочных данных о теплофизических свойствах кофе, которые необходимы для расчета его тепловых режимов – теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности.

Кроме этого отсутствуют данные о плотности как зёрен (зерновки) кофе, так и природы зёрна кофе (насыпной плотности зёрна кофе).

Теоретический расчет теплофизических свойств не только насыпной плотности зёрна кофе, но и самих зерновок, невозможно провести из-за большого количества неизвестных факторов – пористости зерновки, скважности слоя дисперсного материала, теплофизических компонентов составляющих зёрна кофе.

В связи с вышеизложенным, был выбран экспериментальный метод определения теплофизических характеристик кофе в виде зерновой массы.

Таким образом, задача данного исследования состоит в следующем:

- а) в определении насыпной плотности зёрна кофе;
- б) в разработке методики теплофизических исследований свойств зерновой массы кофе;
- в) в проведении теплофизических исследований и обработки их результатов.

Для проведения теплофизических исследований сотрудниками предприятия по производству кофе «UkrCoffee» были переданы образцы зёрен кофе.

Натура или насыпная плотность зёрна кофе определялась традиционным объемно-весовым методом [2, 3] с помощью лабораторного оборудования Одесской национальной академии пищевых технологий (ОНАПТ).

Получено значение насыпной плотности зёрна кофе $\rho_{нас} = 674 \text{ кг/м}^3$ или удельный объем насыпной плотности зёрна $\nu_{нас} = 1,484 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Согласно рекомендациям [2], физическая плотность зерновки кофе определялась погружением зерновой массы в воду.

Получена истинная или физическая плотность зерновки кофе $\rho_{физ} = 1087 \text{ кг/м}^3$ и скважность (порозность) слоя дисперсного материала (зерновой массы), которая представляет собой отношение объема воздушных пор в слое к общему объему слоя $\varepsilon = 0,38$.

С учетом жестких ограничений по времени при выборе методов теплофизических исследований остановились на экспресс-методах [2, 5], которые позволяют оперативно провести исследования с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Был выбран экспресс-метод, разработанный специалистами ОНАПТ [4], который рассматривает зерновую массу как пористое тело. Схема экспери-

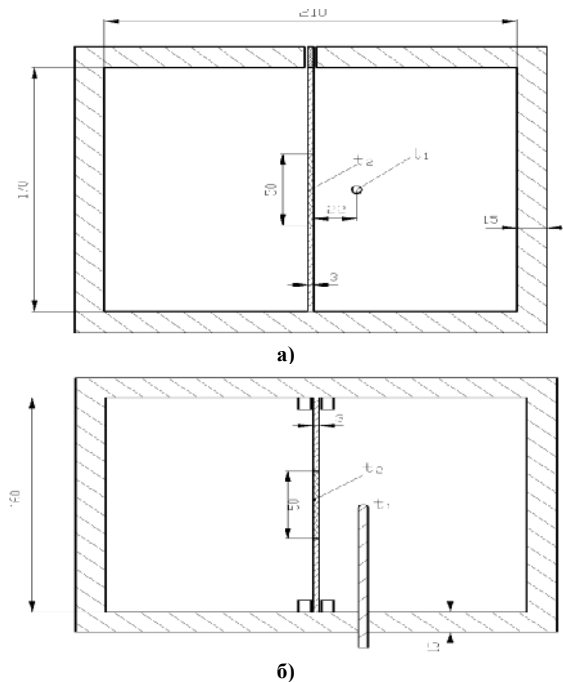


Рис. 1. Схема экспериментальной установки а) вид сбоку; б) вид сверху

ментальной установки приведена на рис. 1.

Теоретическое обоснование метода следующее. Принимаем, что тепловой поток в центральной части пластины перпендикулярный ее поверхности. Исследуемый массив считаем однородным. В начальный момент времени температура во всех точках одинакова (θ_0), за исключением той части, что занимает погруженная нагретая пластина (h – толщина пластины, T_0 – температура пластины).

Уравнение теплопроводности в одномерном случае при нестационарном режиме имеет вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $a = \frac{\lambda}{c \rho}$ – коэффициент температуропроводности, m^2/c ;

c – массовая теплоемкость, Дж/(кг·К);

ρ – плотность, кг/м³;

θ – текущая температура шлама в точке x в момент времени τ , т.е. $\theta = f(x, \tau)$.

В случае, когда толщина нагретой пластины очень мала, а интенсивность плоского источника тепла $q_0 = T_0 \cdot b$ величина постоянна, то повышение температуры на расстоянии x от пластины через время τ после погружения пластины в кофейный шлам будет определяться по формуле [4]:

$$\Delta \theta = \frac{q_0}{2 \sqrt{\pi a \tau}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}. \quad (2)$$

Количество тепла, которое приходится на единицу поверхности источника, составляет

$$q = C_v \cdot q_0, \quad (3)$$

где C_v – объемная теплоемкость, Дж/(м³·К).

Формулу (2) можно представить как

$$\Delta \theta = \frac{A}{\sqrt{\tau}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}, \quad (4)$$

где $A = \frac{q_0}{2 \sqrt{\pi a}}$.

Найдем условия максимального повышения температуры в точке x , приравнявая

$$\frac{\partial \Delta \theta}{\partial \tau} = A \cdot e^{-\frac{x^2}{4a\tau}} \cdot \left(-\frac{1}{2} \cdot \tau^{-\frac{3}{2}} + \frac{x^2}{4a} \cdot \tau^{-\frac{5}{2}} \right) = 0,$$

откуда находим

$$a = \frac{x^2}{2 \tau_{\max}},$$

где τ_{\max} – время от начала опыта до момента достижения максимума температуры шлама на расстоянии x от пластины в перпендикулярном направлении.

Таким образом, для определения коэффициента температуропроводности необходимо опытным путем найти время от момента $\tau = 0$ до момента, при котором достигается максимальная температура в шламе на расстоянии x от пластины.

Такой опыт может служить и для определения коэффициента теплопроводности шлама кофе, если считать количество теплоты, которое отдает пластина шламу за соответствующий промежуток времени.

В формуле (3)

$$q_0 = \frac{Q}{C_v \cdot S},$$

где Q – тепло, которое отдает шламу нагретая пластина при ее остывании.

Тогда формулу (1) можно записать в виде

$$\Delta \theta = \theta_\tau - \theta_0 = \frac{Q}{2 C_v S \cdot \sqrt{\pi a \tau}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}. \quad (5)$$

С другой стороны количество тепла, которое отдает пластина

$$Q = m C_{nl} \cdot (T_0 - T_\tau) = \rho_{nl} \cdot S h C_{nl} \cdot \Delta T, \quad (6)$$

где m – масса пластины, кг;

C_{nl} – массовая теплоемкость пластины, Дж/(кг·К);

ρ_{nl} – плотность пластины, кг/м³;

S – площадь сечения пластины, м².

После подстановки (9) в (8) получим формулу для определения температуры шлама в точке x в момент времени τ от начала опыта:

$$\Delta \theta = \frac{\rho_{nl} \cdot C_{nl} \cdot b \cdot \Delta T}{2 C_v \cdot \sqrt{\pi a \tau}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}. \quad (7)$$

Из (10) находим объемную теплоемкость шлама

$$C_v = \frac{\rho_{nl} \cdot C_{nl} \cdot b \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta \theta} \right)}{2 \cdot \sqrt{\pi a \tau}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}. \quad (8)$$

Обозначим

$$A_0 = \frac{\rho_{nl} \cdot C_{nl} \cdot b}{2 \cdot \sqrt{\pi}},$$

где A_0 – постоянная величина экспериментальной установки.

Тогда

$$C_v = \frac{A_o \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta \theta} \right)}{\sqrt{a \tau}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a\tau}} \quad (9)$$

Экспериментальная установка засыпалась зерновой массой кофе, а затем в нее погружалась, предварительно нагретая до $\sim 70^\circ\text{C}$ медная пластина.

Измерения температур в характерных точках проводили 1 раз в 30 с в начальный и конечный периоды.

На рис. 2 приведены характерные данные опыта.

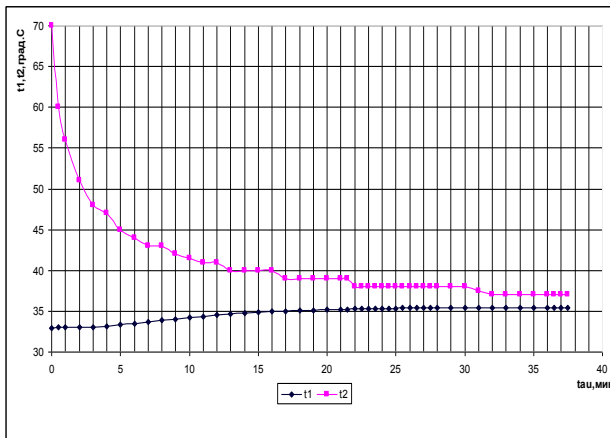


Рис. 2. Изменение температуры в характерных точках экспериментальной установки во времени: t1, t2 – соответственно температуры датчика в зерновой массе и греющей пластины

Базовые данные экспериментальной установки:

- а) расстояние от нагретой пластины до датчика температуры (термопары) в объеме зерновой массы $x = 0,021$ м;
- б) плотность материала пластины и теплоемкость, соответственно, $\rho_{пл} = 8890$ кг/м³; $C_{пл} = 385$ Дж/(кг·К);
- в) коэффициент $A_o = 2900$.

Их графика на рис.2 определен промежуток времени прохождения температурной волны $\tau_{max} = 540$ с.

Рассчитан коэффициент температуропроводности зерновой массы $a = 4,083 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Обработка результатов опыта проводилась по данным в трех точках: 780 с; 1020 с; 1260 с.

Осредненные данные опыта дают следующие результаты:

- а) удельная массовая теплоемкость зерновой массы

$$C_{зерн.массы} = 2244 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

- б) коэффициент теплопроводности зерновой массы

$$\lambda_{зерн.массы} = 0,159 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

В связи с отсутствием данных по теплофизическим свойствам зерновки кофе были проведены оценки на основе полученных экспериментальных данных.

Так, например, удельная массовая теплоемкость

зерновки может быть получена из формулы

$$C_{зерн.массы} = C_{воздуха} \cdot \xi_{воздуха} + C_{зерновки} \cdot \xi_{зерновки}, \quad (10)$$

где $C_{воздуха}, C_{зерновки}$ – удельная массовая теплоемкость, соответственно, воздуха в порах зерновой насыпи ($C_{воздуха} = 1005$ Дж/(кг·К)) и зерновки кофе, Дж/(кг·К);

$\xi_{воздуха}, \xi_{зерновки}$ – массовая доля, соответственно, воздуха в порах зерновой насыпи и зерновки кофе.

Расчеты показали, что $\xi_{воздуха} = 0,0022$, т.е.

наличием воздушной среды можно пренебречь и удельную массовую теплоемкость зерновки кофе принять равной $C_{зерн.массы} = C_{зерновки} = 2244$ Дж/(кг·К).

Коэффициент теплопроводности зерновки можно определить из формулы для расчета эффективной теплопроводности пористого тела [5]:

$$\lambda_{зерн.массы} = \lambda_{воздуха} \cdot \varepsilon + \lambda_{зерновки} \cdot (1 - \varepsilon), \quad (11)$$

где $\lambda_{воздуха}, \lambda_{зерновки}$ – коэффициенты теплопроводности, соответственно, воздуха в порах зерновой насыпи ($\lambda_{воздуха} = 0,0267$ Вт/(м·К)) и зерновки кофе, Вт/(м·К).

Из формулы (11) находим коэффициент теплопроводности зерновки кофе

$$\lambda_{зерновки} = \frac{\lambda_{зерн.массы} - \lambda_{воздуха} \cdot \varepsilon}{1 - \varepsilon} = 0,240 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

Выводы.

В результате экспериментальных исследований и расчетов получены данные по теплофизическим свойствам зерновки кофе и зерновой массы кофе, в частности:

- а) значение насыпной плотности зерна кофе $\rho_{нас} = 674$ кг/м³ или удельный объем насыпной плотности зерна $v_{нас} = 1,484 \cdot 10^{-4}$ м³/кг;
- б) истинная или физическая плотность зерновки кофе $\rho_{физ} = 1087$ кг/м³ и скважность (порозность) слоя дисперсного материала (зерновой массы), которая представляет собой отношение объема воздушных пор в слое к общему объему слоя $\varepsilon = 0,38$;
- в) коэффициент температуропроводности зерновой массы $a = 4,083 \cdot 10^{-7}$ м²/с;
- г) удельная массовая теплоемкость зерновой массы, $C_{зерн.массы} = 2244$ Дж/(кг·К);
- д) коэффициент теплопроводности зерновой массы $\lambda_{зерн.массы} = 0,159$ Вт/(м·К);
- е) удельная массовая теплоемкость зерновки кофе $C_{зерновки} = 2244$ Дж/(кг·К);
- ж) коэффициент теплопроводности зерновки кофе $\lambda_{зерновки} = 0,240$ Вт/(м·К).

Поступила 11.2010

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пеклов А.А., Степанова Т.А. Кондиционирование воздуха. – К.: Вища школа, 1978. – 328 С.
2. Гинзбург А.С., Громов М.А. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы. – М.: Колос, 1984. – 304 с.
3. Чубик И.А., Маслов. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. – М.: Пищевая промышленность, 1970. – 184 с.
4. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Госиздат физ.-мат. литературы, 1962. – 456 с.
5. Лыков А. В. Теплообмен: Справочник. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.