

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

**М.А.Фатыхов, Л.М.Фатыхов**

*Башкирский государственный педагогический университет им.М.Акмиллы, г.Уфа,  
Россия*

**Введение.** При воздействии электромагнитного излучения на конденсированные среды осуществляется необратимое преобразование энергии электромагнитных волн в тепло. При этом происходит нагрев и изменяется агрегатное состояние среды или отдельных ее компонент, например, плавление парафина и разрушение газогидратов [1, 2].

Переход вещества из твердого состояния в жидкое при плавлении и обратный переход при кристаллизации относятся к фазовым переходам первого рода. При таких переходах скачкообразно изменяются плотность, внутренняя энергия и энтропия тела. В процессе фазового перехода из твердого состояния в жидкое (плавление) поглощается некоторая энергия, называемая теплотой плавления. При кристаллизации точно такое же количество энергии выделяется в виде тепла, которое вещество отдает окружающей среде при постоянной температуре кристаллизации  $T_c$ . Это количество теплоты равно:

$$Q = \lambda m. \quad (1)$$

Таким образом, фазовый переход типа плавление (кристаллизация) характеризуется двумя параметрами: температурой и удельной теплотой плавления (кристаллизации). Целью настоящей работы является установление физических предпосылок и исследование влияния сверхвысокочастотного электромагнитного поля на данные параметры.

**Теоретические основы метода.** Известно, что фазовый переход жидкость – кристалл связан со значительным упорядочением расположения атомов, которые в кристалле образуют регулярную решетку. Степень беспорядка системы может быть описана величиной энтропии  $S$ . Согласно формуле Больцмана:

$$S = k \ln \Omega. \quad (2)$$

Беспорядок в системе связан с тепловым хаотическим движением молекул, поэтому сообщение системе некоторого количества тепла  $d'Q$  должно сопровождаться увеличением энтропии  $dS$ . Здесь для определения количества тепла использован знак  $d'$  для того, чтобы подчеркнуть, что  $d'Q$  не является приращением какой-либо функции. Увеличение беспорядка в системе, обусловленное сообщением тепла  $d'Q$ , будет тем меньше, чем больше был начальный беспорядок в системе, характеризующейся температурой  $T$ .

Итак, изменение энтропии системы, которой сообщено бесконечно малое количество тепла  $d'Q$ , будет определяться соотношением:

$$dS = \frac{d'Q}{T}. \quad (3)$$

Если процесс перехода системы из одного состояния в другое является обратимым, то изменение энтропии определяется выражением:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{d'Q}{T}. \quad (4)$$

Для вычисления интеграла в (4) воспользуемся тем, что при кристаллизации температура  $T$  не меняется,  $T = T_{\text{с}} = \text{const}$ . Это позволит вынести ее за знак интеграла, тогда получаем:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{d'Q}{T} = \frac{1}{T_{\text{с}}} \int_1^2 d'Q = \frac{Q}{T_{\text{с}}}. \quad (5)$$

где  $Q = \lambda m$  – количество тепла, отданное окружающей среде в процессе кристаллизации. Таким образом,

$$\Delta S = \frac{\lambda m}{T_{\text{к}}}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что

$$\lambda = \frac{T_{\text{к}}}{m} \Delta S. \quad (7)$$

Из данной формулы видно, что удельная теплота плавления данной массы вещества зависит от изменения энтропии при переходе из одного состояния в другое и температуры плавления.

Термодинамическими исследованиями [3] установлено, что в сверхвысокочастотном электромагнитном поле вида

$$\dot{\vec{E}} = \dot{E}_0 \exp(i\omega t)$$

энтальпия изменяется в соответствии с выражением

$$S = S_m + \frac{1}{4\rho} \frac{\partial}{\partial T} \left[ \varepsilon_0 \left( \varepsilon - \omega \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega} \right) \left( \dot{\vec{E}} \cdot \dot{\vec{E}}^* \right) \right]. \quad (8)$$

В силу формулы (8) следует ожидать, что изменение удельной теплоты плавления должно зависеть от плотности, частотно-температурной зависимости диэлектрических проницаемостей жидкости и кристалла, амплитуды напряженности электрического поля и температуры плавления (кристаллизации).

**Методика экспериментальных исследований.** Для экспериментального определения температуры и теплоты плавления парафина использовался известный метод, заключающийся в получении диаграмм отвердевания, то есть кривой зависимости температуры отвердевающего вещества от времени при неизменных внешних условиях. На таких кривых имеется горизонтальный участок, отражающий приостановку охлаждения. Температура, соответствующая этому участку, и есть температура отвердевания  $T_{\text{с}}$ . Для чистых веществ она является и температурой плавления.

Во время кристаллизации (горизонтальный участок графика) температура кристалла (парафина) и температура окружающей среды не меняются, следовательно, тепловая

мощность (поток тепла), отводимая от образца, также остается постоянной. Таким образом, на горизонтальном участке количество тепла, отведенное от образца, есть:

$$Q = \lambda m = N \Delta \tau, \quad (9)$$

С другой стороны, на спадающем участке кривой тепловая мощность равна скорости изменения внутренней энергии системы (пренебрегая теплоемкостью сосуда, в котором охлаждается образец):

$$N = mc \frac{dT}{d\tau}. \quad (10)$$

Исключив тепловой поток из формул (9) и (10), найдем удельную теплоту плавления:

$$\lambda = \Delta \tau c \left( \frac{dT}{d\tau} \right)_{T \leq T_k}. \quad (11)$$

Формула (11) и является расчетной в настоящем исследовании. Для определения  $\lambda$  необходимо измерить температуру плавления (кристаллизации) вещества  $T_k$ , время кристаллизации  $\Delta \tau$ , а также определить по графику производную  $\left( \frac{dT}{d\tau} \right)_{T \leq T_k}$ .

**Результаты экспериментальных исследований.** Проводились исследования двух образцов парафина одного того же сорта и одинаковой массы. Один из образцов был нагрет посредством теплопроводности, а другой – в СВЧ печи (мощность 800 Вт), приблизительно до 70-75 °С. Затем расплавленный парафин был вылит в тонкостенный алюминиевый стаканчик, в который был опущен термометр, закреплённый в лапке штатива. Измерялась начальная температура парафина. Исследовалась зависимость температуры парафина от времени охлаждения. Показания температуры снимались с интервалом 1 мин.

По результатам опыта были построены графики зависимости температуры парафина от времени охлаждения (рис.1). Из этих графиков была определена температура плавления (кристаллизации) парафина.

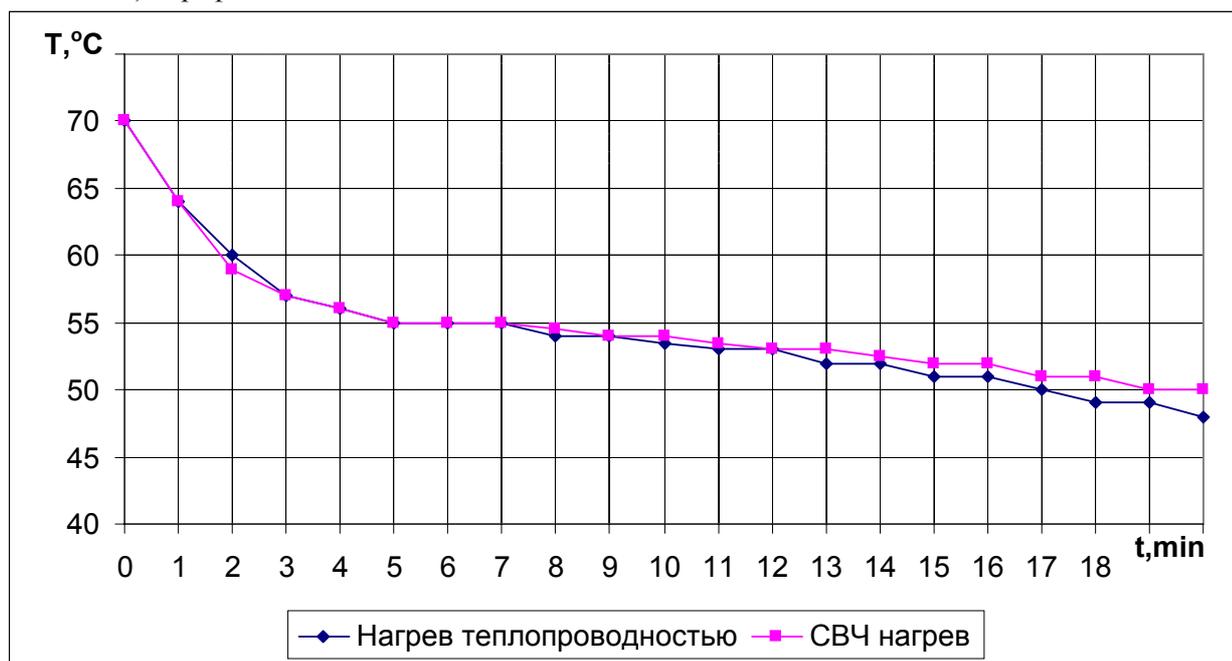


Рис.1. Зависимости температуры парафина от времени охлаждения

Как видно из данного рисунка, электромагнитное поле не влияет на температуру кристаллизации парафина. Для исследованного парафина она составляет 55 °С. Согласно формуле (11), удельная теплота плавления парафина, нагретого посредством теплопроводности, составляет 3450 Дж/кг, а для второго образца – 2460 Дж/кг. Следовательно, в СВЧ поле удельная теплота плавления уменьшается (в настоящем эксперименте на 29%).

**5. Заключение.** Полученный результат свидетельствует о том, что на плавление парафина методом СВЧ воздействия требуется значительно меньшее количество энергии, чем при других методах воздействия.

### Обозначения

$k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $\Omega$  – термодинамическая вероятность;  $m$  – масса вещества, кг;  $\lambda$  – удельная теплота плавления, Дж/кг;  $T_c$  – температура кристаллизации, К;  $c$  – удельная теплоемкость парафина, Дж/(кг·К);  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$  – время фазового перехода, с;  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – время начала и конца фазового перехода, с;  $N$  – тепловая мощность, Вт;  $\omega$  – циклическая частота, рад/с;  $\dot{E}$  – комплексная напряженность электрического поля, В/м;  $\dot{E}_0$  – амплитуда напряженности электрического поля, В/м;  $i$  – мнимая единица;  $t$  – время, с;  $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>; знак \* означает комплексно-сопряженность параметра.

### Литература

1. Фатыхов М.А. Особенности нагрева и плавления парафина в коаксиальной трубе высокочастотным электромагнитным излучением // Теплофизика высоких температур. 2002. Т. 40. № 5. С. 802 – 809.
2. Фатыхов М.А, Багаутдинов Н.Я. Экспериментальные исследования разложения гидрата неполярного газа в трубе при сверхвысокочастотном электромагнитном воздействии //Инженерно-физический журнал. 2005. Т. 78. № 3. С. 108 – 114.
3. Саяхов Ф.Л., Галимбеков А.Д. Основные термодинамические соотношения для поляризующихся и намагничивающихся жидких сред в высокочастотном электромагнитном поле //Физико-химическая гидродинамика: Межвуз. Науч. – Уфа: Башк. гос. ун-т, 1994. С.86 – 92.