

Х. А. КИСТОРИАН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

Явление затвердевания кристаллических расплавов является предметом широкого изучения ввиду его большого значения для ряда технологических процессов, как-то: производство льда, литейное дело и пр. Имеется большое количество теоретических и экспериментальных исследований ряда отечественных и зарубежных авторов. Исследование процесса сводится к получению количественной зависимости, описывающей скорость продвижения фронта затвердевания (граница раздела твердой и жидкой фаз). Предложенное Стефаниом аналитическое решение в виде $\tau = b | \dots$ мало соответствует реальным условиям процесса, так как решение получено в предположении постоянной температуры поверхности влажного грунта и бесконечного значения коэффициента теплоотдачи охлаждающему воздуху. Многочисленные исследования [1, 2, 3] показали, что затвердевание расплавов не подчиняется параболическому закону Стефана. Л. С. Лейбензон [4] предложил метод приведения нестационарного процесса к ряду последовательных квазистационарных процессов. Тогда представляется возможным использовать уравнение Фурье [5].

Рассмотрим затвердевание расплава в цилиндрическом сосуде. Термическим сопротивлением стенки сосуда можно пренебречь. Температура охлаждающей жидкости $t_k = \text{const}$. В расплавленном объеме отсутствует перегрев, и температура расплава равна температуре кристаллизации t_k .

На рис. 1 приведена расчетная схема затвердевания цилиндра. Пусть за время $\Delta \tau$ на стенке цилиндра образовалась твердая корка толщиной τ . Выделим элементарный цилиндрический слой толщиной dr . Рассматривая в течение времени $\Delta \tau$ процесс стационарным, запишем уравнение Фурье

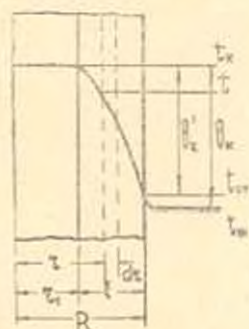


Рис. 1.

$$\Phi = -\lambda \frac{d\theta}{dr} \quad (1)$$

Тепловой поток возникает вследствие выделения на границе раздела фаз скрытой теплоты затвердевания q_k . В таком случае

$$q_k = \frac{q_k \gamma}{2\Delta\tau} \frac{r^2 - r_1^2}{r}. \quad (2)$$

Приравняв (1) и (2), получаем дифференциальное уравнение температурного поля в твердом слое

$$-dr = \frac{q_k \gamma}{2 \cdot \lambda \cdot \Delta\tau} \frac{r^2 - r_1^2}{r} dr. \quad (3)$$

Граничные условия задачи

$$\left. \begin{aligned} \tau = 0, \quad r = R, \quad \theta = 0; \\ \tau = \Delta\tau, \quad r = r_1, \quad \theta = \theta_k = t_k - t_{\infty}; \\ q_R = \alpha(t_k - t_{\infty}). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Решение уравнения (3) имеет следующий вид:

$$M = A_1 [A_2 - (1 - \alpha^2) [A_2 - \ln(1 - \alpha^2)]], \quad (5)$$

где ξ — толщина твердой корки, м;

α — относительная толщина твердой корки;

R — радиус цилиндра, м;

$\Delta\tau$ — время, час;

q_k — скрытая теплота, ккал/кг;

λ — коэффициент теплопроводности твердой корки, ккал/м·час·°C;

c — удельная теплоемкость твердой фазы, ккал/кг·°C;

α — коэффициент теплоотдачи, ккал/м²·час·°C;

$M = BiNF_0 = \frac{\alpha(t_k - t_{\infty})\tau}{q_k \gamma R}$ — безразмерное время затвердевания;

$A_1 = Bi/4$; $A_2 = 1 - 2Bi$;

$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$ — критерий Био;

$N = \frac{c(t_k - t_{\infty})}{h_k}$ — критерий Казея;

$F_0 = \frac{\alpha^2}{R^2}$ — критерий Фурье.

На рис. 2 показан вид этой функции. В качестве параметра взят критерий Био. Для проверки формулы (5) были обработаны экспериментальные данные А. Г. Ткачука и Г. И. Давыдиной [6] по намораживанию льда в цилиндре (рис. 3). Кривая вычислена по формуле (5). Совпадение теоретических и экспериментальных результатов можно считать вполне удовлетворительным.

Вызывает изумление принятый авторами способ приравнивания температуры стенки к температуре затвердевания (0°C), тогда как температура охлаждающей жидкости в опытах менялась от -10 до -30°C. Вполне естественно, что происходит некоторое переохлаждение льда.

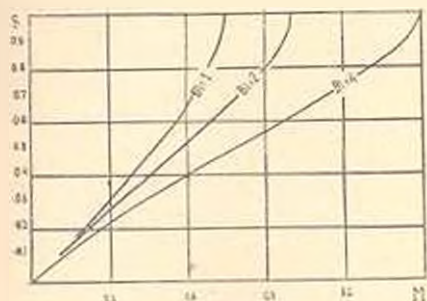


Рис. 2.

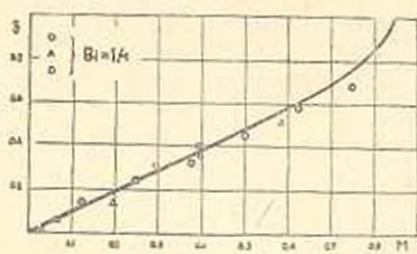


Рис. 3.

Описание экспериментальной установки. Нами было проведено экспериментальное исследование по затвердеванию декагидрата сульфата натрия ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) в цилиндре. Экспериментальная установка представляет собой цилиндр, помещенный в охлаждающую рубашку. Диаметр цилиндра — 80 мм, высота — 150 мм. На высоте 75 мм на оси установлена термopара. Для измерения температуры воды на входе и выходе из рубашки применялись лабораторные термометры с минимальным делением шкалы 0.1. Для повторения опыта затвердевшая в цилиндре соль расплавлялась путем пропускания через рубашку горячей воды. Для этой цели установлен электрический нагреватель.

Методика эксперимента. При сравнении экспериментальных данных ряда авторов с формулой (5) было выяснено, что наибольшее расхождение между этими данными имеет место при $\delta = 1$, т. е. при окончательном затвердевании объема. При значениях $\delta < 1$ указанное расхождение уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением толщины твердой корки увеличивается доля физического тепла в тепловом потоке. Так как при составлении баланса тепла [уравнения (1) и (2)] нами эта часть теплового потока не была учтена, то естественно, что наибольшие расхождения между теоретическими и экспериментальными данными наблюдаются при $\delta = 1$.

С другой стороны, при расчете химических аккумуляторов тепла, основанных на принципе использования скрытой теплоты фазовых превращений, необходимо, при заданных τ_k , α и физических параметрах твердой фазы, определить оптимальный радиус цилиндра. Для этого положим $\delta = 1$. Тогда формула (5) будет выглядеть:

$$M = 0,5 + 0,25 B_1. \quad (6)$$

Следовательно, суть методики состоит в определении времени окончательного затвердевания t_k . В опыте это достигалось измерением температуры расплава на оси цилиндра. При достижении точки перегиба (затвердевание расплава на оси цилиндра) фиксировалось время t_k . Замеры производились через каждые 5 минут. Ход температуры охлаждающей воды и теплового потока показан на рис. 4. Изменение температуры воды на входе $t_{ж}$ объясняется некоторой

тепловой инерцией нагревателя, через который протекает охлаждающая вода. Изменение же температуры нагретой воды обусловлено увеличением термического сопротивления твердой корки. Раз-

ность ординат u указывает степень аккумуляции в твердом слое части выделившегося тепла и замедление процесса затвердевания, вследствие увеличения теплового сопротивления твердого слоя.

Полученные результаты были обработаны в координатах $M; B$. Как видно из рис. 5, экспериментальные точки хо-

рошо укладываются на прямую, вычисленную по формуле (5).

Пренебрегая физическим теплом затвердевающего слоя, удалось получить простые формулы, описывающие процесс кристаллизации.

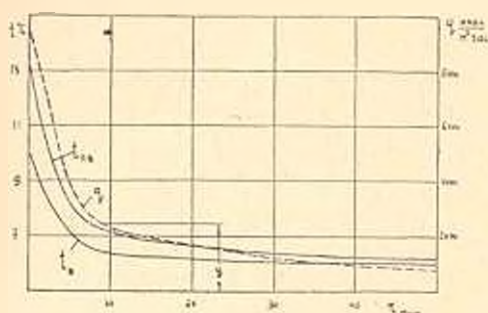


Рис. 4.

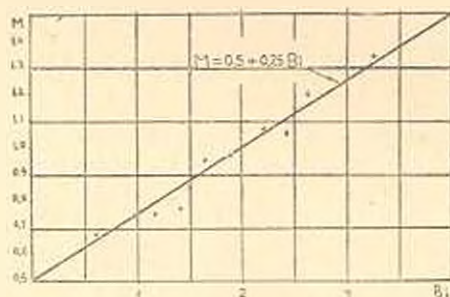


Рис. 5.

Эти формулы хорошо согласуются с экспериментальными данными в области веществ, представляющих интерес для аккумуляторов солнечного отопления. Проведены исследования кристаллизации декагидрата сульфата натрия; результаты подтверждают теоретическую формулу.

Поступило 2.1.1959

ЛИТЕРАТУРА

1. Тагеев В. М., Гуляев Б. Б. „Металлург“, № 8, 1939.
2. Жегалов А. К., Тагеев В. М. „Металлург“, № 2, 1938.
3. Вейник А. В., Гухман А. А. ЖТФ, т. XXI, вып. 1, 1951.
4. Лейбензон Л. С. Руководство по нефтепромысловой механике, ч. 1, 1931.
5. Кистряни Х. А. „Известия АН Армянской ССР“, сер. технических наук, т. XII, № 1, 1959.
6. Ткачев А. Г., Данилина Г. Г. Вопросы теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества. Госэнергоиздат, 1953.