

УДК 621.1.016.4: 536.24

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ БИТУМА ПРИ УПАКОВЫВАНИИ В ПОЛИЭТИЛЕНОВУЮ ПЛЕНКУ

П.В. КОВАЛЕНКО

(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается задача охлаждения водой расплава битума в разъемной металлической форме, после его заливки в пленочную тару и доохлаждения полученного брикета в ванне. Получены количественные оценки продолжительности охлаждения битумного брикета в форме до достижения вблизи его поверхности слоя заданной толщины и изменение этой толщины и температуры поверхности во время охлаждения вне формы. Показано, что формирование защитного слоя твердого битума происходит значительно быстрее у материала с температурой застывания 90 °С.

В соответствии с предлагаемой технологией [1,2] охлаждение битума происходит в две стадии. На первой стадии охлаждения упаковка с битумом находится в форме до момента формирования на внутренней стороне пленочной тары защитного слоя затвердевшего битума необходимой толщины, обеспечивающего сохранность тары при перемещении брикета в ванну.

Время нахождения брикета с битумом в форме, а следовательно время охлаждения, на этой стадии, с одной стороны, обеспечивает сохранность тары от разрушения, с другой - определяет производительность оборудования.

На второй стадии упаковка с битумом находится в ванне. Время охлаждения на этой стадии определяет геометрические параметры установки по упаковыванию битума в полиэтиленовую пленку. Установлено, что основными показателями, определяющими время охлаждения брикета, являются: свойства битума, его начальная температура и температура хладагента.

Для определения оптимальных технологических параметров оборудования необходимо получить уравнение расчета процесса охлаждения битума при упаковывании в полиэтиленовую пленку, устанавливающего зависимость скорости формирования защитного слоя битума на полиэтиленовой пленке, в зависимости от его свойств, начальной температуры и температуры хладагента.

По разработанной технологии для упаковывания битума используются полиэтиленовые мешки или блочная тара из рукава, что позволяет иметь конфигурацию брикета битума, близкую к прямоугольной, а его ширину значительно меньше длины и высоты. Поэтому битум, залитый в пленочную тару, орошаемую водой, рассматриваем как систему двух пластин, находящихся в тепловом контакте.

Расчетная схема процесса охлаждения битума, упакованного в полиэтиленовую пленку, представлена на рис. 1.

Таким образом, для стадии заливки имеем симметричную задачу нестационарного процесса охлаждения при свободном движении жидкости в ограниченном объеме (жидкий битум в таре).

Найдем закон распределения температуры в битуме, упакованном в полиэтиленовую пленку, скорость изменения толщины слоя застывающего битума, необходимую толщину защитного твердого слоя битума, обеспечивающего сохранность тары, от времени его охлаждения.

Распределение температуры внутри жидкости при допущении постоянства теплофизических свойств, описывается, как известно, следующим уравнением [3]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

С учетом допущений об одномерном переносе тепла (т.е. только по толщине слоя) и малости конвективных потоков уравнение упрощается.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (2)$$

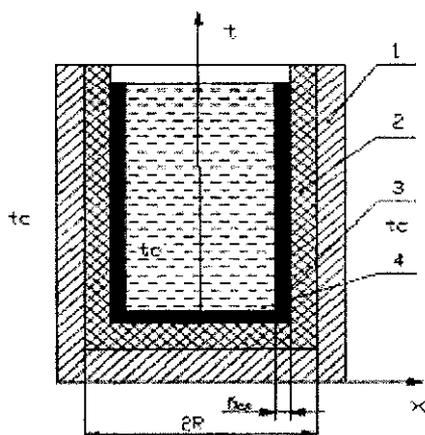


Рис. 1. Расчетная схема

1 - форма; 2 - полиэтиленовая пленка;  
3 - слой затвердевшего битума; 4 - жидкий битум

С учетом изменения теплофизических свойств битума уравнение (2) может быть записано в следующем виде:

$$\rho(t)C(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right). \quad (3)$$

Толщина пленочной тары  $\delta$  составляет от 60 до 200 мкм, т.е. она пренебрежимо мала по сравнению с толщиной брикета битума  $2R$ , которая по разработанной технологии равняется 80...100 мм. В то же время теплопроводность полиэтилена почти в 3 раза превышает теплопроводность битума. Таким образом, термическое сопротивление полиэтиленовой пленки  $\delta/\lambda$  невелико, и его наличие практически не изменяет температуру у поверхности упаковки.

В связи с этим граничные условия 2-го рода [4], задающие условия сопряжения тепловых потоков и температур соприкасающихся сред на границе раздела (между битумом и пленкой), имеющие вид:

$$q_{1r=0} = q_{1r+\delta}; T_{1r=0} = T_{1r+\delta} \quad (4)$$

допустимо заменить условиями 3-го рода теплообмена между битумом и водой:

$$\lambda \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} = \alpha_c [t(R, \tau) - t_c], \quad (5)$$

Определить характер распределения температуры в битуме можно, оценив величину критерия Био:

$$Bi = \frac{\alpha_c R}{\lambda}, \quad (6)$$

где  $Bi$  – критерий Био;  $\alpha_c$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $R$  – расстояние от поверхности, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К.

Приняв для воды значение  $\alpha_c = 250$  Вт/м<sup>2</sup>·К [5], для битума  $\lambda = 0,12$  Вт/м·К [6] и  $R = 0,05$  м, имеем  $Bi = 104$ .

При  $Bi > 100$  температура на поверхности сразу после заливки битума становится практически равной температуре охлаждающей воды вследствие высокой интенсивности теплоотвода водой и малой теплопроводности битума.

Тогда граничные условия третьего рода переходят в условия первого рода – постоянство температуры на поверхности:

$$t(x, \tau) = t_c \text{ при } \tau = 0 \text{ и } x = 0, \quad (7)$$

где  $t(x, \tau)$  – текущая температура битума, °С;  $t_c$  – температура охлаждающей среды, °С;  $\tau$  – время, с;  $x$  – текущая координата, м.

С учетом этих допущений и постоянства теплофизических свойств поставленная задача преобразуется в классическую задачу нестационарной теплопроводности с граничными условиями первого рода, решение которой для бесконечной пластины имеет следующий вид [3, 5, 7]:

$$\theta = \frac{t(x, \tau) - t_c}{t_0 - t_c} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (8)$$

где  $\theta$  – относительная, избыточная температура;  $t_0$  – начальная температура битума, °С;  $A_n, \mu_n$  – коэффициенты уравнения;  $Fo = \frac{\alpha \cdot \tau}{R^2}$  – критерий Фурье;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Для стадии заливки, время охлаждения тары с битумом составляет 2...3 минуты, при этом величина критерия Фурье мала, т.е.  $Fo \ll 0,3$ . При малых значениях  $Fo$  расчет относительной, избыточной температуры как функции относительной координаты  $x/R$  и числа Фурье может быть выполнен по следующему уравнению [3, 5, 7]:

$$\theta = \frac{t(x, \tau) - t_c}{t_0 - t_c} = \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) = \operatorname{erf} \left( \frac{1}{2\sqrt{Fo_x}} \right), \quad (9)$$

где  $\operatorname{erf}$  – функция, называемая интегралом вероятности или интегралом ошибок.

Для инженерных расчетов функция  $\operatorname{erf}$  может быть аппроксимирована следующим выражением [8]:

$$\operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) = \sqrt{1 - \exp \left[ -1,28 \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right)^2 \right]}. \quad (10)$$

Расчетные значения температуры могут быть найдены по уравнению:

$$t_p = \theta(t_0 - t_c) + t_c, \quad (11)$$

где  $t_p$  – расчетная температура битума, °С.

А.В. Лыковым показано, что охлаждение в первые моменты времени происходит аналогично охлаждению полуограниченного тела, а когда начало координат находится на поверхности, число Фурье рассчитывается по следующему уравнению:

$$Fo_x = a\tau/x^2, \quad (12)$$

Температурное поле битума, упакованного в полиэтиленовую пленку (при охлаждении водой), рассчитано по уравнению (9) и (11) и представлено на рисунке 2.

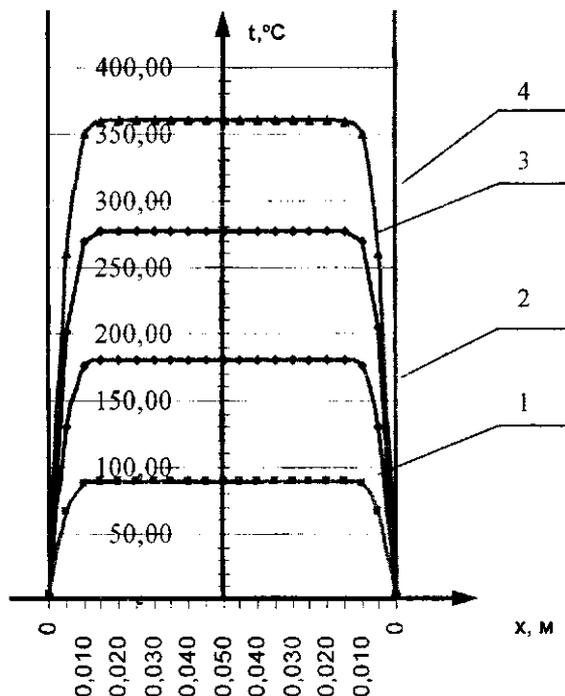


Рис. 2. Распределение температур в упаковке битума при  $t_c = 5$  °С:  
1 –  $t_0 = 90$  °С; 2 –  $t_0 = 180$  °С; 3 –  $t_0 = 280$  °С; 4 –  $t_0 = 360$  °С

Для получения уравнения, определяющего скорость формирования защитного слоя твердого битума, на первом этапе охлаждения, примем  $i(x, \tau) = i_3(\delta, \tau)$ , а  $x = \delta_{\text{сл}}$  в уравнении (9) и найдем зависимость толщины формирования слоя твердого битума, на внутренней поверхности тары, от времени его охлаждения:

$$\frac{t_s(\delta, \tau) - t_c}{t_0 - t_c} = \operatorname{erf}\left(\frac{\delta_{\text{сл}}}{2\sqrt{a\tau}}\right), \quad (13)$$

где  $t_s$  – температура застывания битума, °С;  $\delta_{\text{сл}}$  – толщина слоя твердого битума, м.

Графики изменения толщины слоя твердого битума вблизи поверхности охлаждения от времени, получены на основании уравнения (13) (рис. 3).

На основании анализа полученных графиков можно сделать следующие выводы:

- скорость формирования защитного твердого слоя битума зависит от его свойств, в частности, от температуры застывания (КиШ): чем выше температура застывания битума, тем быстрее формируется защитный слой;

- формирование защитного твердого слоя битума происходит быстрее при более низких температурах хладагента и битума;

- для начальной стадии охлаждения имеем линейную зависимость изменения  $\delta_{\text{сл}}$  от  $\tau$ , т.е. можно считать режим охлаждения регулярным.

Как известно, регулярный режим характеризуется постоянством темпа охлаждения для всех точек твердого тела. Темп охлаждения определяется величиной  $m$  [6, 7]:

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (14)$$

где  $m$  – темп охлаждения,  $1/с$ ;  $\vartheta_1$  – разность температур в данной точке тела и охлаждающей среды (избыточная температура) в момент времени  $\tau_1$ ,  $^{\circ}C$ ;  $\vartheta_2$  – то же в момент времени  $\tau_2$ ,  $^{\circ}C$ .

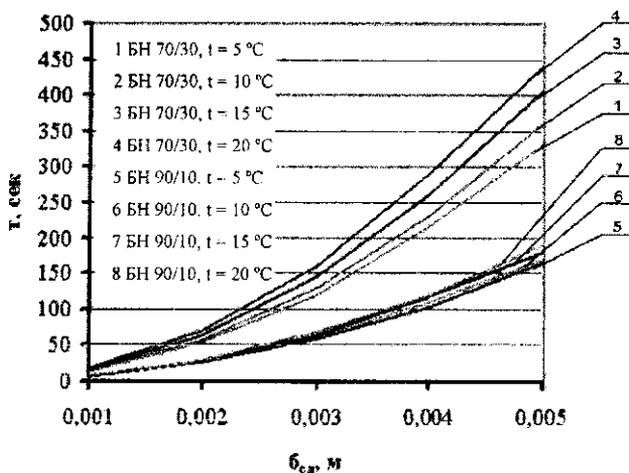


Рис. 3. Скорость формирования слоя твердого битума при  $t_0 = 120^{\circ}C$

В условиях интенсивного внешнего теплоотвода, в частности при охлаждении водой (при  $Bi > 100$ ), темп охлаждения зависит только от теплофизических свойств тела, его конфигурации и размеров [6, 7]:

$$m = \frac{a}{k}, \tag{15}$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрической формы и размеров тела, м.  
Для бесконечной пластины толщиной  $2R$

$$K = \left( \frac{2R}{\pi} \right)^2. \tag{16}$$

Полученные уравнения в зависимости от свойств битума, его температуры и температуры хладагента позволяют:

- получить распределение температуры в упаковке битума в любой момент времени;
- рассчитать время и скорость формирования защитного твердого слоя битума;
- определить необходимую толщину слоя твердого битума, обеспечивающую безопасную эксплуатацию оборудования;
- определить производительность оборудования по упаковыванию битума в полиэтиленовую пленку;
- определить необходимое количество хладагента;
- на стадии проектирования определить оптимальные технологические и конструкционные параметры оборудования;
- на стадии эксплуатации автоматизировать процесс упаковывания битума в полиэтиленовую пленку.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РБ № 139. Способ упаковки тугоплавких битумов в термопластичную пленку / З.С. Теряева, В.К. Липский, С.С. Шалаев, П.И. Швед; Заявл. 23.12.85; Опубл. // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. --2003. -№ 1.
2. Патент РБ № 4970. Способ упаковывания горячепластичных материалов в полимерную рукавную пленку /З.С. Теряева, В.К. Липский, П.В. Коваленко; Заявл. 15.06.98; Опубл. // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. - 2003. - № 1.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности.- М.: Высшая школа, 1967. -600 с.
4. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. - М: Энергоиздат, 1990. - 367 с.
5. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. - Л., Химия, 1976.
6. Кондратьев Г.М., Регулярный тепловой режим: М., Гостехиздат, 1954.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. - М; Энергоиздат, 1981.-416с.
8. Резников А.Н., Резников А.А. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов. - М.: Машиностроение, 1990.-288 с.