

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЛАВА БИТУМА В ПОЛИМЕРНОЙ УПАКОВКЕ

канд. техн. наук, доц. П. В. КОВАЛЕНКО

*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Беларусь*

Аннотация. В статье рассматривается задача охлаждения расплава битума в полиэтиленовой упаковке с использованием численного моделирования. Проанализирован процесс охлаждения битума в разъемной металлической форме с применением водяного охлаждения и без орошения. Получены количественные оценки времени охлаждения до формирования защитной корки на поверхности брикета и изменения температурного поля внутри брикета. Представлены результаты, показывающие, что температура застывания материала существенно влияет на скорость формирования защитного слоя. Также оценены условия, при которых возможно полное расплавление битума при отсутствии орошения. Результаты могут быть использованы для оптимизации технологического процесса и повышения качества упаковки битума.

Ключевые слова: охлаждение расплава, битум, полиэтиленовая упаковка, численное моделирование, теплообмен, фазовый переход, защитная корка, температура застывания, охлаждение водой, инженерные расчеты.

Технология производства битума включает этап его разлива в полиэтиленовую тару. Во время заливки, пленочная тара с горячим жидким продуктом размещается вертикально в разъемной металлической форме, где в течение двух-трех минут ее наружная поверхность охлаждается водой до образования у поверхности формы (и полиэтиленовой пленки) защитной корки застывшего материала. На этой стадии, основной задачей является обеспечение сохранности пленки. Риск ее проплава связан с тем, что температура заливаемого продукта составляет 140–170 °С, а температура плавления полиэтилена около 100 °С. После выхода брикета из формы он доохлаждается в ванне с водой. При этом часть пакета контактирует с воздухом. На практике для предотвращения расплавления полиэтиленовой пленки на данном этапе брикет орошается водой. Интерес представляет анализ теплового процесса в битумном брикете при отсутствии орошения, позволяющий получить оценку максимальных температур в данной системе и очертить условия, гарантирующие сохранность упаковки на стадии доохлаждения.

Скорость заполнения полиэтиленовой тары, температура заливаемого битума, интенсивность и продолжительность охлаждения битумного брикета в форме определяют производительность оборудования, энергозатраты и качество продукции. Цель данной работы – теоретически исследовать процесс охлаждения расплавленного битума в полиэтиленовой таре и количественно оценить влияние некоторых из перечисленных выше факторов на этот процесс.

Исследования микроструктуры битума, выполненные разными авторами (см., например, [1]) показывают, что этот материал в твердой фазе представляет собой многокомпонентную систему, содержащую лишь небольшую долю вещества в кристаллической форме. Основная часть битума находится в аморфном состоянии. В диапазоне температур 0–150 °С теплоемкость битума изменяется приблизительно по линейному закону. Таким образом, теплом фазового перехода при плавлении/затвердевании данного материала можно пренебречь.

Конфигурация брикета битума близка к прямоугольной, а его ширина ($2R = 100$ мм) значительно меньше длины и высоты. Поэтому битум, залитый в пленочную тару, орошаемую

водой, рассматриваем как систему двух пластин, находящихся в тепловом контакте (рис. 1), а уравнение энергии в виде

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right), \quad (1)$$

при начальном распределении температуры по толщине брикета

$$T(t=0, x) = T_0. \quad (2)$$

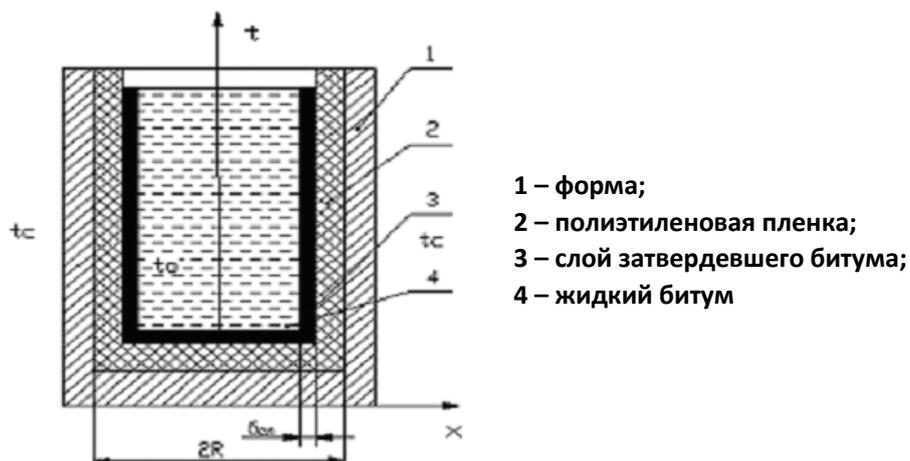


Рисунок 1. – Расчетная схема

Толщина пленочной тары δ составляет от 60 до 200 мкм, т.е. пренебрежимо мала по сравнению с толщиной брикета битума $2R$, которая по разработанной технологии равна $80 \div 100$ мм. В то же время теплопроводность полиэтилена почти в 3 раза превышает теплопроводность битума. Таким образом, термическое сопротивление полиэтиленовой пленки δ/λ невелико и ее наличие практически не изменяет температуры у поверхности упаковки. В связи с этим граничные условия 2-го рода, задающие условия сопряжения тепловых потоков и температур соприкасающихся сред на границе раздела (между битумом и пленкой) допустимо заменить условиями 3-го рода теплообмена на поверхности брикета:

$$-\lambda \frac{\partial T(R, t)}{\partial x} = \alpha_c [T(R, t) - T_c]. \quad (3)$$

В центральной плоскости брикета имеем граничное условие

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (4)$$

В (2)–(3) T_0 – температура расплава битума при заливке в форму, T_c – температура воды, охлаждающей брикет.

Зависимость теплофизических свойств битума от температуры можно аппроксимировать следующими соотношениями:

$$\rho(T) = 1042 - 0.6T, \text{ кг/м}^3, \quad (5)$$

$$C(T) = 1670 + 2.8T, \text{ Дж}/(\text{кг } ^\circ\text{C}), \quad (6)$$

$$\lambda(T) = 0.208T^{-0.1064}, \text{ Вт}/(\text{м } ^\circ\text{C}). \quad (7)$$

В выражениях (5)–(7) размерность температуры полагается $^\circ\text{C}$.

Будем рассматривать также приближенное решение задачи (1)–(4) при допущении постоянства теплофизических свойств и граничном условии первого рода на поверхности битумного брикета. В относительных координатах это решение имеет вид [2]

$$\Theta(Fo, x/R) = \frac{T - T_f}{T_0 - T_f} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\cos(\mu_n x/R)}{\mu_n} e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (8)$$

где $\mu_n = (2n-1)\pi/2$, $Fo = at/R^2$.

Целесообразность такого рассмотрения обусловлена тем, что при характерных значениях коэффициентов теплопроводности битума ($\lambda = 0,12 \text{ Вт}/\text{мК}$) и теплоотдачи при орошении водой ($\alpha_c \approx 250 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{К}$), а также расстоянии от серединной плоскости битумного брикета до его боковой поверхности $R = 0,05 \text{ м}$, имеем значение критерия Био $Bi = 104$. Т.е. можно ожидать, что температура на поверхности вскоре после заливки битума становится близкой к температуре охлаждающей воды вследствие высокой интенсивности теплоотвода водой и малой теплопроводности битума.

Задача (1)–(7) решена конечно-разностным методом. На рис. 2 показано влияние коэффициента теплоотдачи на кинетику изменения температуры поверхности (T_w) битума в форме.

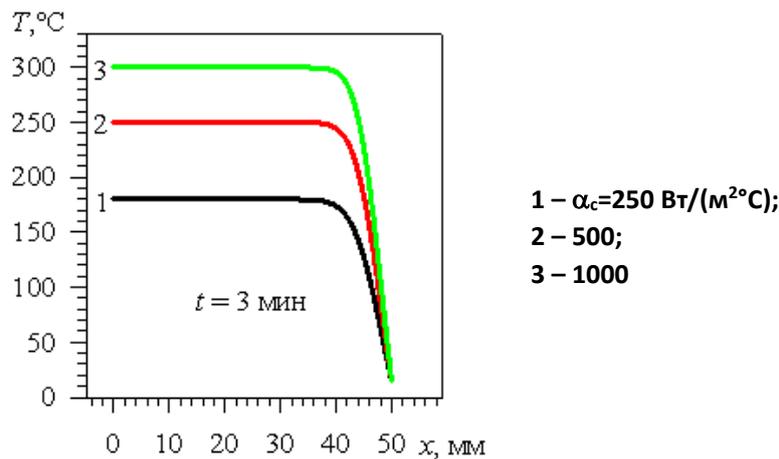
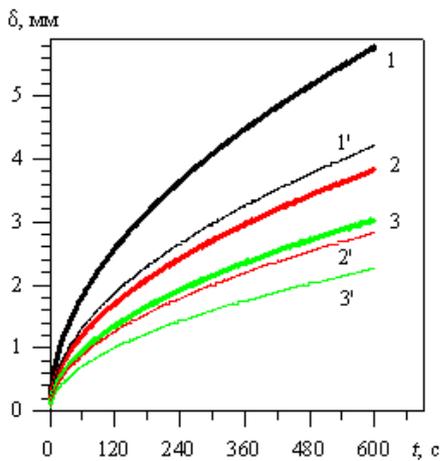


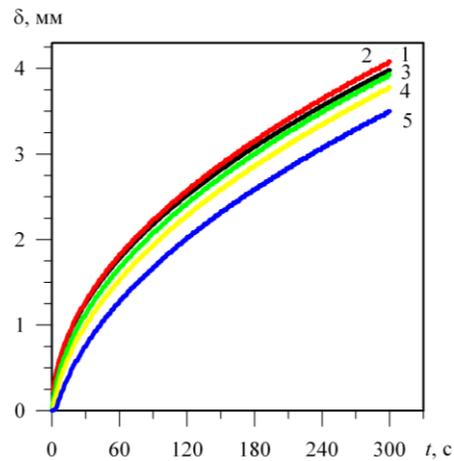
Рисунок 2. – Кинетика охлаждения поверхности брикета в форме при $T_0 = 180^\circ\text{C}$, $T_c = 14.5^\circ\text{C}$, $R = 50 \text{ мм}$

Можно видеть, что во всех рассмотренных случаях температура на поверхности оказывается ниже температуры плавления полиэтиленовой пленки, но при $\alpha_c < 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{C})$ и продолжительности пребывания битума в форме менее 2 мин заметно отличается от температуры воды, охлаждающей форму (следствие очень малых Fo).

Кинетику образования слоя застывшего битума у поверхности иллюстрируют рис. 3 и рис. 4 (линиям 1'–3' соответствует температура застывания 70°C).



1 – $\alpha_c = \infty$; 2 – $\alpha_c = 300$; 3 – $\alpha_c = 250$ – для битума БН 90/10; (1'–3') – для битума БН 70/30, при $T_0 = 180^\circ\text{C}$, $T_c = 14.5^\circ\text{C}$



1 – $\alpha_c = \infty$ (8); 2 – ∞ (1)–(7); 3 – $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°К})$; 4 – 500; 5 – 250; при $T_0 = 180^\circ\text{C}$, $T_c = 14.5^\circ\text{C}$

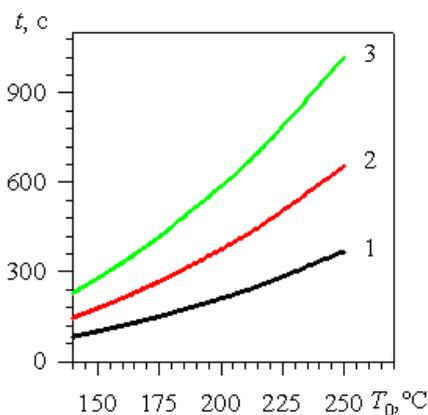
Рисунок 3. – Влияние температуры размягчения битума на кинетику увеличения толщины слоя застывшего битума

Рисунок 4. – Влияние коэффициента теплоотдачи на кинетику увеличения толщины слоя застывшего битума БН 90/10

$T_c = 14.5^\circ\text{C}$, температура застывания 90°C

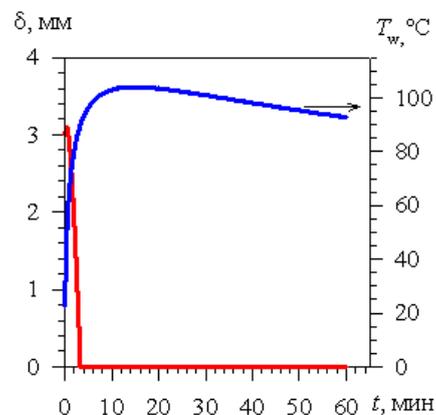
Температура застывания T_3 очень сильно влияет на процесс образования защитной корки битума. При переходе от $T_3 = 90^\circ\text{C}$ к $T_3 = 70^\circ\text{C}$ продолжительность образования защитного слоя толщиной 3 мм возрастает примерно в два раза. Следует также отметить близость результатов при моделировании кинетики застывания битума на основании аналитического решения (8) и численного решения задачи (1)–(7) с учетом температурной зависимости теплофизических свойств для случаев коэффициентов теплообмена между формой и охлаждающей ее водой превышающих $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°К})$.

На рис. 5–6 показаны продолжительность 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 на воздухе с коэффициентом теплоотдачи $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С})$.



1 – $\delta = 3 \text{ мм}$, 2 – 4, 3 – 5; $\alpha_c = \infty$, $T_c = 14.5^\circ\text{C}$

Рисунок 5. – Время формирования твердого слоя битума заданной толщины в зависимости от начальной температуры битума БН 90/10



$T_c = 20^\circ\text{C}$ (температура воздуха)

Рисунок 6. – Кинетика изменения толщины слоя застывшего битума и температуры поверхности брикета

Результаты моделирования показывают, что даже при $Bi > 100$, но малых (меньше 3 мин) временах охлаждения ($Fo < 0.01$) температура поверхности брикета заметно отличается от температуры охлаждающей его воды. Формирование защитного слоя твердого битума происходит значительно быстрее у материала с температурой застывания 90°C , нежели 70°C . При доохлаждении на воздухе без орошения водой возможно полное расплавление битума. Аналитическое решение тепловой задачи может быть использовано для моделирования кинетики образования защитного приповерхностного слоя корки битума в случаях достаточно интенсивного охлаждения формы водой с коэффициентами теплоотдачи более $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K})$. При этом целесообразно принимать значения теплофизических параметров, соответствующими температуре застывания битума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Masson K. F., Polomark G. M. Bitumen microstructure by modulated differential scanning calorimetry // *Thermodynamica Acta*. 2001. Vol. 374, N2. P.105–114.
2. Теплотехника: учеб. для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др. М.: Высш. шк. – 2000. – 671 с.