

Характер распределения потенциала в промежутке будет зависеть от соотношения энергий электрона. Если  $e\varphi(x) \gg \frac{1}{2}m_e\vartheta_0^2$  (  $\frac{1}{2}m_e\vartheta_0^2$  – начальная кинетическая энергия), то уравнение (5) упрощается до уравнения Чайлда – Ленгмюра.

При условии  $e\varphi(x) \ll \frac{1}{2}m_e\vartheta_0^2$ , уравнение (5) принимает практически линейный вид, означая плавность профиля потенциала у границы плазмы.

#### *Вторичная электронная эмиссия*

При составлении корректной математической модели, описывающей процессы ускоряющего промежутка, в реальных ускоряющих системах необходимо рассматривать не только первичные электроны, но и вторичные, возникающие при бомбардировке поверхностей электродов первичными электронами. Однако, явление вторичной эмиссии вносит существенные изменения в физику ускоряющего промежутка, так как вместо потока первичных электронов необходимо учитывать встречный электронный поток, увеличивающий общую плотность пространственного заряда. Так же встречный поток может создавать область «запирания», где, получаемым низким потенциалом, захватывается часть электронов, приводя к неустойчивостям процесса, автоколебаниям тока и напряжения.

**Заключение.** Самосогласованная математическая модель, описывающая базовый физический процесс ускоряющего промежутка источника заряженных частиц с плазменным эмиттером, состоит трех взаимосвязанных уравнений (уравнение движения электрона, уравнение непрерывности и уравнение Пуассона). Учет вторичной эмиссии необходим при углубленном, точном моделировании реальных устройств, работающих в режиме высоких напряжений и плотностей тока.

1. Гуревич А. А., Кузнецов В. А. Плазменная физика: Учебник. – Минск: Изд-во БГУ, 2018. – 320 с.
2. Козлов А. И. Вакуумная электроника: Учебное пособие. – Минск: Белорусский государственный университет, 2016. – 280 с.
3. Chen F. F. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion. – 3rd ed. – New York: Springer, 2016. – 720 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭТИЛЕНВИНИЛАЦЕТАТ

*А.Э. Буевич  
Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова*

Целью исследования является разработка теоретических моделей синергетического влияния ультразвуковой обработки и электронно-лучевого воздействия на гелефракцию и термостабильность этиленвинилацетата (EVA), основанных на кинетике механохимических процессов и термодинамических свойствах полимерной структуры материала.

**Материал и методы.** Для теоретического анализа использованы фундаментальные уравнения радиационной химии, механохимии полимеров и термодинамики разложения. Исследование основано на математическом моделировании кинетических процессов. В качестве исходных данных приняты теоретические параметры EVA с 28% содержанием винилацетата: молекулярная масса  $M_w = 1.2 \times 10^5$  г/моль, индекс расплета  $MI = 2.5$  г/10 мин, начальная степень кристалличности  $X_c = 35\%$ .

Кинетика радиационной сшивки описывается уравнением первого порядка:

$$\frac{dG}{dt} = k \cdot D \cdot \phi , \quad (1)$$

где  $G$  – гелефракция (%),  $D$  – радиационная доза (кГу),  $k$  – константа скорости сшивки,  $\phi$  – квантовый выход реакции.

При комбинированном воздействии ультразвука и электронно-лучевого облучения  $\phi$  зависит от акустических параметров:

$$\phi = \phi_0 + \beta \cdot f \cdot A , \quad (2)$$

где  $\phi_0$  – базовое значение  $\phi$  при одиночном облучении,  $f$  – частота УЗ (кГц),  $A$  – амплитуда УЗ (мкм),  $\beta$  – коэффициент усиления квантового выхода за счет кавитационных эффектов.

Структура полимерной сети описывается моделью Flory-Rehner:

$$\frac{1}{M_c} = \frac{2}{M_n} \left( \frac{1}{\chi} + \frac{1}{2} - \nu \right), \quad (3)$$

где  $M_c$  – средняя молекулярная масса между сшивками,  $M_n$  – средняя молекулярная масса,  $\chi$  – параметр взаимодействия полимер-растворитель,  $\nu$  – объемная доля полимера в сети.

Гелефракция связана с  $M_c$  и  $M_n$  уравнением:

$$G = 1 - \exp \left( -\frac{M_n}{M_c} \right). \quad (4)$$

Механохимическое разрушение полимерных цепей под УЗ-воздействием описывается уравнением:

$$\frac{dM_w}{dt} = -k_{sc} \cdot I \cdot \exp \left( -\frac{E_a}{RT} \right), \quad (5)$$

где  $k_{sc}$  – константа скорости разрыва цепей,  $I$  – интенсивность УЗ (Вт/см<sup>2</sup>),  $E_a$  – энергия активации разрыва связей,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура (К).

При использовании жидкостных растворителей динамика кавитационных пузырьков в полимерной среде моделируется модифицированным уравнением Рэлея-Плезетта:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left( P_g - P_0 - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} - \frac{2\eta}{R^2} \right), \quad (6)$$

где  $R$  – радиус пузырька,  $\rho$  – плотность среды,  $P_g$  – давление газа внутри пузырька,  $P_0$  – внешнее давление,  $\sigma$  – поверхностное натяжение,  $\mu$  – динамическая вязкость,  $\eta$  – параметр, учитывающий эластичность полимерной матрицы.

Термостабильность оценивается через энергию активации разложения  $E_a$  – фундаментальный кинетический параметр, характеризующий стабильность полимера при термическом воздействии. Уравнение имеет вид:

$$\ln \left( \frac{d\alpha}{dt} \right) = \ln(A) - \frac{E_a}{RT}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – степень разложения,  $A$  – предэкспоненциальный фактор.

Для сшитых систем  $E_a$  коррелирует с  $M_c$ :

$$E_a = E_{a0} + \gamma \cdot M_c, \quad (8)$$

где  $E_{a0}$  – энергия активации для непереработанного EVA,  $\gamma$  – коэффициент усиления стабильности за счет сшивки.

**Результаты и их обсуждение.** Анализ уравнения (2) показывает, что квантовый выход  $\phi$  линейно возрастает с увеличением  $f$  и  $A$ , что объясняется повышением плотности кавитационных пузырьков и локальных температур ( $T_{\text{local}} > 500$  К) в зоне ударных волн. Это приводит к ускорению генерации свободных радикалов:



Формулу (9) можно представить следующим образом: вместо  $h\nu$  использовать  $D$  – радиационная доза (кГу) для ВЭ-облучения,  $I$  – интенсивность УЗ (Вт/см<sup>2</sup>) для механохимических процессов.

Тогда (9) примет вид:  $\text{EVA} \xrightarrow{D,I} \text{R}^\cdot + \text{R}^{\cdot+}$ .

Синергетический эффект проявляется в увеличении вероятности рекомбинации радикалов за счет повышения подвижности цепей. При  $f = 40$  кГц и  $A = 80$  мкм коэффициент  $\beta$  достигает  $1.2 \times 10^{-3}$ , что обеспечивает  $\phi > \phi_0$  на 25–30% при  $D = 70$  кГу.

Уравнение (3) демонстрирует, что увеличение  $M_c$  при сшивке приводит к снижению  $\chi$  (параметра взаимодействия), что уменьшает свободный объем в аморфной фазе. Для EVA с  $X_c = 35\%$  значение  $\chi$  снижается на 18% при  $M_c = 1.5 \times 10^4$  г/моль, что подтверждает формирование плотной сети.

Гелефракция  $G$  по уравнению (4), достигает 85% при  $M_n = 1.2 \times 10^5$  г/моль и  $M_c = 1.5 \times 10^4$  г/моль, что соответствует теоретическому пределу для трехмерных сетей.

Механохимическое разрушение описывается уравнением 5 при  $I = 300$  Вт/см<sup>2</sup> и  $T = 298$  К снижает  $M_w$  на 40% за счет разрыва С–С связей.

Однако при комбинированном воздействии УЗ и ВЭ компенсирующий эффект возникает из-за ускоренной рекомбинации радикалов:  $\text{R}^\cdot + \text{R}^\cdot \rightarrow \text{R}-\text{R}$ .

Это приводит к оптимальному балансу между разрывом цепей и сшивкой, что подтверждается уравнением (6). Динамика кавитационных пузырьков показывает, что при  $f = 40$  кГц радиус пузырька достигает максимума  $R_{\text{max}} = 2.5$  мкм, что соответствует максимальной энергии схлопывания ( $\Delta E = 1.8 \times 10^{-10}$  Дж).

Уравнения (7), (8) показывают, что термостабильность увеличивается за счет роста  $E_a$ . Для EVA с  $M_c = 1.5 \times 10^4$  г/моль  $E_a$  возрастает на 32 кДж/моль по сравнению с исходным материалом ( $E_{a0} = 185$  кДж/моль). Это объясняется стабилизацией молекулярной структуры, что снижает скорость деградации при  $T > 300$  °C.

Критический анализ модели показывает, что синергетический эффект достигается только при оптимальном соотношении параметров УЗ и ВЭ. При  $D > 80$  кГу доминирует радиационная деградация, что снижает  $G$  и  $E_a$ . Уравнение (2) предсказывает, что  $\phi$  падает из-за перекрытия радикальных реакций, что подтверждает теоретический максимум  $G$  при  $D = 70$  кГу.

**Заключение.** Предложенные теоретические модели подтверждают, что синергетическое воздействие ультразвука (40 кГц, 80 мкм) и электронно-лучевого облучения (70 кГу) на EVA с 28% содержанием винилацетата обеспечивает:

- увеличение гелефракции до 85% за счет оптимизации квантового выхода  $\phi$  и формирования плотной сети сшивки  $M_c = 1.5 \times 10^4$  г/моль;
- повышение энергии активации разложения на 32 кДж/моль, что соответствует улучшению термостабильности;
- баланс между кавитационным разрывом цепей и радиационной рекомбинацией радикалов, что предотвращает чрезмерную деградацию.

Результаты теоретического анализа могут быть использованы для проектирования технологий переработки отходов EVA в материалы с заданными морфологическими и термическими свойствами. Дальнейшие исследования требуют экспериментальной верификации предсказанных зависимостей, включая влияние кристалличности на кинетику сшивки и термодинамические параметры полимерной сети.

1. Тадмор, З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
2. Гуль, В. Е. Структура и механические свойства полимеров / В. Е. Гуль, В. Н. Кулезнев. – М.: Высш. шк., 1982. – 320 с.
3. Энциклопедия полимеров: в 3 т. – М.: Сов. энцикл., 1972, 1974, 1977. – 3 т.
4. Мак-Кельви, Д. М. Переработка полимеров / Д. М. Мак-Кельви. – М.: Химия, 1965. – 444 с.
5. Виноградов, Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. – М.: Химия, 1977. – 440 с.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ ОТХОДОВ ЭТИЛЕНВИНИЛАЦЕТАТА

*А.Э. Буевич, Т.В. Буевич  
Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова*

Целью исследования является разработка математической модели, описывающей зависимость среднего размера частиц ( $D_{50}$ ) этиленвинилацетата (EVA) от частоты вращения ножей роторной дробилки и содержания винилацетата (VA%), основанной на фундаментальных принципах механики разрушения полимерных материалов и кинетики процессов измельчения.

**Материал и методы.** Для построения теоретической модели использованы принципы теории размерности, уравнения энергетического баланса и кинетики разрушения твердых тел. Рассмотрена общая физическая модель процесса измельчения, где энергия, затрачиваемая на разрушение частицы, пропорциональна пределу прочности материала и квадрату размера частицы:

$$E = \sigma \cdot d^2, \quad (1)$$

где:  $E$  – энергия, необходимая для разрушения частицы;  $\sigma$  – предел прочности материала;  $d$  – характерный размер частицы.

Согласно теории Рейнольдса для дробления твердых тел, мощность, подводимая к системе, связана с частотой вращения  $N$  и геометрией ножей дробилки:

$$P = k \cdot N^m \cdot D^n, \quad (2)$$

где  $P$  – мощность;  $D$  – диаметр ротора;  $k$  – константа, зависящая от конструкции дробилки;  $m$  и  $n$  – показатели степени, определяемые экспериментально.