

Закключение. 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 ϕ 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. Бувич, Т.В. Бувич
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; σ – 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.

В теоретическом анализе предполагается, что $m = 2$ для роторных дробилок при ламинарном режиме движения.

Для полимерных материалов предел прочности σ зависит от химического состава. В случае EVA, содержание винилацетата (VA%) определяет степень кристалличности X_c , которая влияет на механические свойства. Теоретическая зависимость между σ и VA% выражается через экспоненциальную функцию:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot \text{VA}\%), \quad (3)$$

где σ_0 – предел прочности при $\text{VA}\% = 0$; α – коэффициент, характеризующий чувствительность прочности к содержанию винилацетата.

Кинетика изменения размера частиц описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dD_{50}}{dt} = -k \cdot P^q, \quad (4)$$

где: D_{50} – средний размер частиц; k – кинетический коэффициент; q – показатель степени, определяемый механизмом разрушения.

Интегрирование этого уравнения при постоянной мощности P дает:

$$D_{50}(t) = D_{50,0} \cdot \exp(-k' \cdot P^q \cdot t), \quad (5)$$

где: $D_{50,0}$ – начальный размер частиц; k' – константа, объединяющая параметры k и q .

Для установления стационарной зависимости между D_{50} и N при постоянном времени обработки t используется метод анализа размерностей. Выбираются ключевые переменные: D_{50} , N , $\text{VA}\%$, σ , ρ (плотность), μ (вязкость). По теореме Пи-теорема Бухингема, число безразмерных групп равно $(n - m)$, где n – число переменных, m – число основных размерностей.

$$\text{Для данной задачи: } \pi_1 = \frac{D_{50}}{D_{\text{ref}}}, \quad \pi_2 = \frac{N}{N_{\text{ref}}}, \quad \pi_3 = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{ref}}}, \quad \pi_4 = \text{VA}\%.$$

Модель строится в виде:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4). \quad (6)$$

Такая модель приводит к обобщенному уравнению:

$$D_{50} = a \cdot N^b \cdot \sigma^c \cdot (\text{VA}\%)^d + e, \quad (7)$$

где a, b, c, d, e – безразмерные коэффициенты.

Подстановка выражения для σ из уравнения (3) в (6) дает окончательный вид модели:

$$D_{50} = a \cdot N^b \cdot \exp(-c \cdot \alpha \cdot \text{VA}\%) \cdot (\text{VA}\%)^d + e. \quad (8)$$

Результаты и их обсуждение. Анализ теоретической модели показывает, что показатель степени b при частоте вращения N должен быть отрицательным, что соот-

ветствует обратной зависимости размера частиц от скорости вращения. Это следует из энергетического баланса: при увеличении N мощность P возрастает, что ускоряет разрушение частиц. Физический смысл коэффициента b связан с геометрией ножей дробилки и режимом резания в рабочей камере. Для роторных дробилок теоретически $b \in [-0.4, -0.2]$, что подтверждается общими законами дробления твердых тел. Коэффициент c в экспоненциальной части уравнения определяет влияние предела прочности σ материала на размер частиц. Поскольку σ уменьшается с ростом VA%, экспоненциальный член $\exp(-c \cdot \alpha \cdot \text{VA}\%)$ увеличивает D_{50} при повышении VA%. Это согласуется с теоретическими представлениями о снижении механической прочности полимеров при увеличении содержания аморфных компонентов. Показатель степени d при VA% отражает нелинейное влияние химического состава на процесс измельчения. Теоретический анализ указывает на положительное значение d , что означает рост D_{50} с увеличением VA%. Это объясняется двойным эффектом, а именно, снижением прочности σ и изменением вязкоупругих свойств, что замедляет кинетику разрушения. Коэффициент a характеризует масштабный фактор, зависящий от геометрии ножей дробилки и начальных условий, например начальной фракции вещества. Теоретически a пропорционален D_{ref} , где D_{ref} – характерный размер частицы, определяемый конструкцией ножей дробилки. Коэффициент e представляет базовый размер частиц при условной нулевой мощности. В теоретической модели он равен нулю, так как при отсутствии приложения энергии процесс измельчения не происходит. Однако в реальных условиях e может быть ненулевым из-за начального размера частиц, что требует учета в практических приложениях.

Уравнение (8) можно упростить, выразив σ через VA% напрямую. Для EVA теоретически $\sigma \propto (1 - \text{VA}\%)^k$, где k – эмпирический коэффициент. Тогда модель, описанная выражением (8), принимает вид:

$$D_{50} = a \cdot N^b \cdot (1 - \text{VA}\%)^c \cdot (\text{VA}\%)^d + e. \quad (9)$$

Это уравнение демонстрирует влияние VA%. При низких значениях VA% доминирует влияние кристалличности $c > 0$, а при высоких – преобладание аморфной фазы $d > 0$.

Решение кинетического уравнения (5) относительно t позволяет оценить время достижения стационарного размера частиц:

$$t_{st} = \frac{1}{k' \cdot P^q} \cdot \ln \left(\frac{D_{50,0}}{D_{50,\text{нб}}} \right). \quad (10)$$

Для EVA теоретически $q \approx 0.5$, что указывает на диффузионно-контролируемый механизм разрушения. Это согласуется с теорией, по которой для полимеров кинетика измельчения определяется скоростью распространения трещин, а не мгновенным разрушением.

Заключение. Разработанная математическая модель демонстрирует фундаментальную связь между параметрами процесса измельчения и физико-химическими свойствами EVA, подтверждает ключевую роль энергетического баланса и кинетики разрушения в процессе измельчения полимерных материалов. Теоретический анализ указывает на необходимость учета как механических свойств (прочность, вязкость),

так и структурных характеристик (кристалличность, аморфность) для точного прогнозирования поведения системы.

Полученные результаты имеют важное значение для разработки адаптивных алгоритмов управления процессами переработки полимеров. Модель позволяет экстраполировать результаты на различные типы роторных дробилок и полимерных систем без проведения экспериментальных исследований. Дальнейшие теоретические исследования должны быть направлены на уточнение коэффициентов модели с использованием методов вычислительной механики и анализа размерностей, а также на учет влияния температурных и влажностных условий на кинетику измельчения.

Данная работа вносит вклад в развитие теоретических основ механики полимеров, обеспечивая математическую основу для оптимизации промышленных процессов переработки отходов этиленвинилацетата.

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.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ АДАПТАЦИИ ЗАДАНИЙ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТИВНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

*Н.В. Булгакова
Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова*

Мы живем в уникальное время – в эпоху искусственного интеллекта. С появлением больших языковых моделей технология ИИ пришла в нашу повседневную жизнь, нашу работу и наше образование. Использование преподавателями больших языковых моделей (LLM, Large Language Models), таких как ChatGPT, существенно уплотняет наше время, снимая с нас множество рутинных задач и делая нас более эффективными.

Особенно ценным этот технологический прорыв становится при решении сложных педагогических задач, требующих не просто автоматизации процессов, а интеллектуальной адаптации содержания. Одной из таких задач в современном высшем образовании является поддержка иностранных студентов и создание для них образовательных условий. Именно здесь генеративный искусственный интеллект (ГИИ) перестает быть просто удобным инструментом и становится стратегической основой для построения персонализированного и инклюзивного обучения.

Рост числа поликультурных студенческих групп обнажает проблему «тройного барьера» у иностранных студентов первого курса: **языкового** (технические инструкции), **когнитивного** (абстрактные интерфейсы графических редакторов, например, PhotoShop, Inkscape, Blender) и **мотивационного** (отчужденность от абстрактных учебных задач). Традиционные методы адаптации материалов силами преподавателя непозволительно ресурсоёмки и не обладают необходимой гибкостью. В этой связи актуальной задачей является разработка методик, использующих потенциал ГИИ, для оперативной персонализации учебного контента и нивелирования указанных барьеров, что соответствует тенденциям цифровой образовательной среды.

Новизна исследования заключается в разработке цифрового методического конструктора на базе ГИИ, где ядром является не разовый контент, а воспроизводимый алгоритм (система промптов) для адаптации всех элементов лабораторной работы под