

Abstract. In this article an analytical description of isotropic lines of zero length and minimal surfaces is carried out with the help of function of a complex variable. The integral dependences of the formation of imaginary isotropic lines, found from the condition of equality of zero differential of the arc of the spatial line, are used. Parametric equations of isotropic lines are found using functions $u = \operatorname{cth} t$; $v = i \cdot \operatorname{csch} t$. Analytical description of minimal surfaces and associated minimal surfaces in complex space made of isotropic lines as lines of a translation net. The expressions of the coefficients of the first quadratic form of the formed minimal surfaces are given.

It is explored that for the indicated functions satisfying the condition one can find an analytical description of two different spatial isotropic lines of zero length using the functions of a complex variable. Each isotropic line corresponds to the minimal surface and the associated minimal surface, which have similar properties of the curvature of the surface. Use of function of a complex variable allows to get a simple analytical description of minimal surfaces, investigate their design geometrical parameters. Prospects for further research are to determine the differential characteristics of the created minimal surfaces for optimization of engineering methods of designing surfaces of technical forms.

Keywords: isotropic line, minimal surface, associated minimal surface, hyperbolic functions, quadratic form of a surface, function of a complex variable

УДК 662.7

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОПЛИВНЫХ ГРАНУЛ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ

Д. Н. КОРИНЧУК, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

К. А. КОРИНЧУК, инженер

Институт технической теплофизики НАН Украины

E-mail: Korinchuk@nas.gov.ua

Аннотация. Исследовано термическое разложение измельченной и гранулированной при различных давлениях древесины сосны. Прочность возникших межмолекулярных связей в гранулированной биомассе может отражаться на кинетических параметрах термического разложения биомасс. Исследование влияния давления прессования на кинетические характеристики термического разложения биомассы позволит расширить понимание механизмов гранулообразования биополимеров.

© Д. Н. Коринчук, К. А. Коринчук, 2018

Целью данной работы является определение, с использованием модели неизотермической кинетики Бройдо, кинетических параметров десорбции физически связанной влаги и активационных процессов неизотермического разложения гемицеллюлозы древесной биомассы в зависимости от давления прессования.

Проведен анализ термодеструкции по кинетической модели Бройдо образцов биотоплив из древесины сосны, измельченных и гранулированных при давлении 80–120 МПа, отобранных на территории Украины. Представлены результаты расчета кинетических параметров для стадий десорбции физически связанной влаги и термического разложения гемицеллюлоз. Значение энергии активации десорбции влаги для биомассы сосны находится в диапазоне 52,6–57,5 кДж/моль, где меньшее значение соответствует измельченной древесине, а большее – давлению прессования 120 МПа. Рассчитаны значения кинетических констант термического разложения гемицеллюлоз. Значение энергии активации для измельченной биомассы составляет 104 кДж/моль и повышается для гранул с увеличением давления прессования до 137–170 кДж/моль, что составляет 37–70 %, где большее значение соответствует давлению прессования 120 МПа.

Установлено, что гранулированное биотопливо обладает более высокой термической стойкостью в периодах десорбции влаги и разложения гемицеллюлоз, и она возрастает с повышением давления прессования. Данное явление объяснено частичной сшивкой макромолекул полисахаридного комплекса биомассы между собой либо через молекулу воды, что подтверждает основные положения молекулярной теории брикетирования.

Ключевые слова: *биотопливо, биомасса, сосна, гранулирование, энергия активации, метод неизотермической кинетики, модель Бройдо*

Актуальность. Биомасса является сложным объектом для энергетического использования. Неоднородный гранулометрический состав, колебания влажности, калорийности приводят к снижению эффективности сжигания данного топлива в котлах. Регулярная наладка и оптимизация режимов работы котельного оборудования требуют высокой квалификации обслуживающего персонала. Более простой путь повышения эффективности энергетического использования биомассы – нормализация биотоплива по гранулометрическому составу и влажности – обеспечит снижение эксплуатационных затрат и высокую эффективность работы оборудования [1].

Повысить качественные показатели топлива, привести их к единым стандартным показателям позволяют технологии гранулирования. В основе механизма гранулирования лежат вызванные давлением и деформацией физико-химические молекулярные взаимодействия в многокомпонентной системе взаимосвязанных биополимеров, заключенных в капиллярно-пористую коллоидную структуру биомассы.

Прочность возникших межмолекулярных связей в гранулированной биомассе может отражаться на кинетических параметрах термического разложения биомасс. Исследование влияния давления прессования на кинетические характеристики термического разложения биомассы позволит расширить понимание механизмов гранулообразования биополимеров.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследования в области термического разложения гранулированных биомасс немногочисленны и отражены в работах [2–5].

Представленные в работе [3, 4] результаты свидетельствуют о том, что прессование биомассы снижает прочность молекулярных контактов, поскольку значения энергии активации у гранулированной биомассы ниже, чем у исходного сырья. Данные результаты противоречат молекулярной теории брикетирования [6], согласно которой, образование гранул происходит в результате молекулярного контакта частиц непосредственно между собой либо через молекулу воды. Соответственно, в гранулированной биомассе количество межмолекулярных связей должно превышать значения для измельченной биомассы, и эффективные значения энергии активации также должны повышаться.

В то же время, измельчение биомассы ведет к деструкции макроструктуры полимеров и уменьшению степени молекулярного взаимодействия. Объяснить полученные результаты можно тем, что перед исследованием гранулированное сырье подвергалось размолу, как и исходное. Однако суммарное механическое воздействие прессования и размола могло привести к большим механическим деструктивным явлениям, которые появились в значениях энергии активации. В работе [2] присутствуют обратные утверждения о повышении энергии активации в гранулированном биотопливе, но в области разложения лигнина, что связано, скорее всего, с высокотемпературным прессованием сырья в области пластификации лигниновой составляющей. Существующие исследования достаточно противоречивы и не раскрывают связи механизмов гранулирования биомассы и кинетических характеристик термического разложения.

Цель исследования – определение, с использованием модели неизотермической кинетики Бройдо, кинетических параметров десорбции физически связанной влаги и активационных процессов неизотермического разложения гемицеллюлозы древесной биомассы в зависимости от давления прессования.

Материалы и методы исследования. Образцы древесной биомассы предоставлены ООО Интерсорс, г Берегово. Влажность, плотность, зольность, теплота сгорания исследуемых проб образцов определялись по стандартным методикам (табл. 1). Для проведения исследований влияния давления прессования на кинетические параметры термического разложения биомассы было разработано и изготовлено специальное оборудование (рис.1). Устройство для получения гранул представляет собой

разборную матрицу и пуансон для прессования сырья в гранулы диаметром 8 мм. Высота гранулы зависела от объема исходной смеси. Внутри гранулы формировалось отверстие для размещения в тигле и плотного контакта материала гранулы и термопары дериватографа. Прессование производилось при температуре сырья 25 °С.



Рис. 1. Оборудование для изготовления образцов гранул

Перед термическими исследованиями только негранулированное биотопливо подвергалось размолу. Характеристики биотоплива и параметры давления прессования представлены в табл. 1.

1. Характеристики исследуемых образцов древесины сосны

№	Давление прессования, МПа	Плотность аналитической пробы, кг/м куб.	Влажность Аналитическая W^a , %	Зольность аналитическая на сухую массу A^a , %	Низшая теплота сгорания на аналитическую массу Q^a , МДж/кг
1	0	350 (насыпной вес)			
2	80	890	7,15	0,9	17,2
3	100	920			
4	120	960			

Термические исследования биомассы, торфа, и композиционных топлив проводили на синхронно-термическом дериватографе Q-1000 (Paulik Erdey) в диапазоне температур 20...1000 °С при скорости нагрева 7,4 К/мин. Атмосферой служила неподвижная воздушная среда. В качестве инертного вещества в тигле сравнения использовали оксид алюминия. Коррекцию шкалы температур осуществляли по температуре перехода 573 К кварца с α - в β -форму.

Анализ кинетики термодеструкции образцов проводили на основании термогравиметрических данных в температурном диапазоне до 500 °С. В качестве критерия оценки участия отдельных полимеров древесины в гранулообразовании принималось значение энергии активации удаления влаги и термоокислительной деструкции. Энергия активации термоокислительной деструкции – избыток энергии, необходимый для разрушения химических связей, образующих основную цепь полимера, под воздействием тепла и кислорода воздушной среды. Кривые термогравиметрии позволяют определить энергию активации термоокислительной деструкции, которую рассчитывали с использованием модели Бройдо, применяемой к пиролизу целлюлозы и основанной на двойном логарифмировании.

Этот метод расчета в настоящее время широко используется для изучения зависимости механических свойств полимеров от их химического состава и строения [7]. Суть метода заключается в предположении, что степень конверсии или разложения исследуемого вещества может быть описана выражением:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = K \cdot (1 - \alpha)^n, \quad (1)$$

где K – константа скорости реакции разложения исследуемого вещества;

α – степень конверсии биотоплива;

n – порядок реакции;

τ – время термического разложения, с⁻¹.

Константа скорости реакции разложения исследуемого вещества может быть найдена из уравнения Аррениуса:

$$K = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (2)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, с⁻¹;

E – энергия активации, кДж/моль;

T – температура исследуемого вещества, К.

Степень разложения материала может быть рассчитана как убыль массы вещества, отнесенная к массе вещества за вычетом зольного остатка по уравнению:

$$\alpha = \frac{m_0 - m(\tau)}{m_0 - m_{\kappa}}. \quad (3)$$

Подставив уравнение (2) в уравнение (1), получим зависимость: (4)

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot (1 - \alpha)^n. \quad (4)$$

Разделив левую и правую части уравнения (4) на скорость нагрева $\beta = \frac{dT}{d\tau}$, получим следующую зависимость:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT}} \cdot (1-\alpha)^n. \quad (5)$$

Предположим, что реакции термического разложения имеют порядок, удовлетворяющий условию $n \leq 1$. Разделив переменные в уравнении (5) и проведя интегрирование правой и левой части, получим зависимость:

$$\int_0^\alpha \frac{d\alpha}{(1-\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (6)$$

Интеграл по температуре приближенно может быть рассчитан по следующему уравнению:

$$\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} e^{-\frac{E}{RT}} = \frac{R}{E} T_{ext}^2 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (7)$$

где T_{ext} – опорная температура, которая соответствует экстремуму скорости разложения вещества.

Заменяя интеграл по температуре и интегрируя правую и левую часть уравнения, получим:

$$-\ln(1-\alpha) = \frac{A R}{\beta E} T_{ext}^2 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (8)$$

После логарифмирования правой и левой части уравнения (8) получим:

$$\ln(-\ln(1-\alpha)) = \ln\left(\frac{A R}{\beta E} T_{ext}^2\right) - \frac{E}{RT}. \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что значение энергии активации E может быть определено как тангенс угла наклона линейного участка кривой, построенной в координатах: $\ln(-\ln(1-\alpha)); \frac{1000}{T}$. Проанализировав кривые термического разложения можно выделить линейные участки, аппроксимировать их линейным уравнением типа $y = a \cdot x + b$, где величина параметра a соответствует величине $\frac{R}{E}$, b – соответствует комплексу $\ln\left(\frac{A R}{\beta E} T_{ext}^2\right)$, из которого может быть найдено значение предэкспоненциального множителя.

Результаты исследований и их обсуждение. В исследуемом температурном диапазоне можно наблюдать процессы удаления связанной влаги и термическое разложение углеродсодержащих биополимерных комплексов гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина. Идентифицировать

влияние режима гранулообразования на кинетические параметры термодеструкции возможно в периодах десорбции влаги и первичного разложения биомассы, т. е. разложения гемицеллюлоз. Оба периода представляют интерес и с позиции проведения термоподготовки биомассы с целью удаления балластных составляющих с высоким содержанием кислорода, что улучшает энергетические показатели биотоплива.

В интервале температур разложения исследуемых образцов от 25 до 500 °С по термодинамическим зависимостям были построены зависимости степени конверсии от температуры в координатах $\ln(-\ln(1-\alpha)); \frac{1000}{T}$. Полученные графические зависимости для

исходного сырья древесины сосны и гранул (рис. 1), проанализированы на предмет линейных участков соответствующих убыли массы образцов. Графические зависимости для гранул, полученных при давлении прессования 100 МПа и 120 МПа совпадали, поэтому на рис. 1 кривая, полученная при давлении 100 МПа, не приводится. Фрагменты графиков в области (а), соответствуют периоду десорбции физически связанной влаги из микро- и макропор, фрагменты графиков в области (b) преимущественно термодеструкции гемицеллюлоз. Как видно из (рис.1), эти участки достаточно точно аппроксимируются линейными зависимостями, что говорит о порядке суммарных реакций протекающих в образцах $n \approx 1$. В первом периоде убыль массы исследованных образцов коррелирует со значениями влажности.

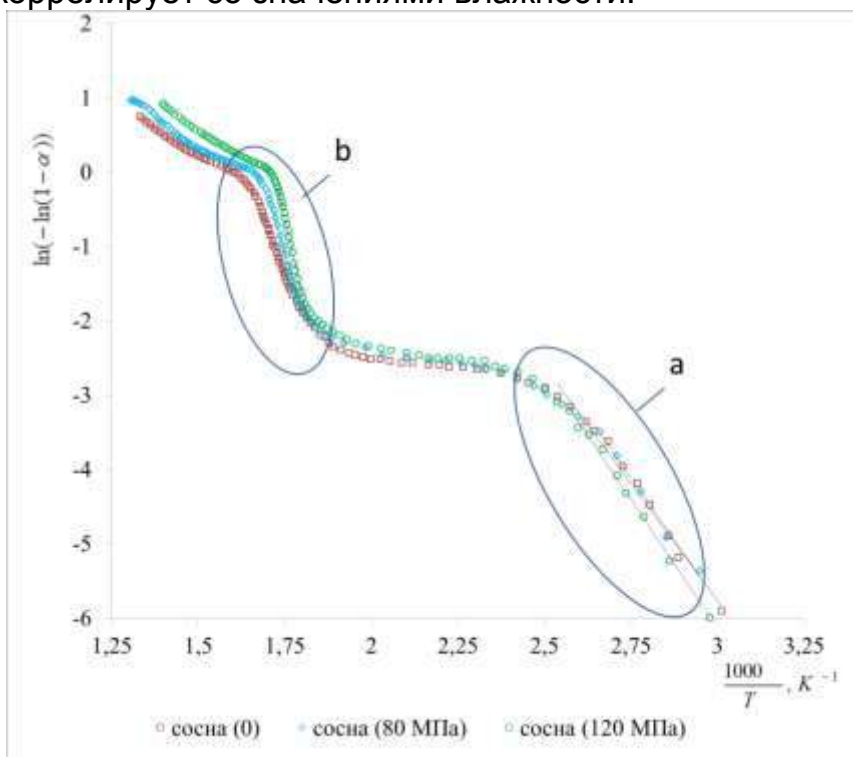


Рис. 2. Графические результаты анализа неізотермического разложения биомассы древесины в исходном и гранулированном состоянии. Участок а – период преимущественно десорбции влаги, b – период неізотермического разложения гемицеллюлоз

Уравнения регрессии и рассчитанные по ним величины энергии активации для участка преимущественной десорбции влаги, представлены в табл. 2. В интервале температур 130...230 °С для биомассы сосны существенных изменений массы не наблюдается. Разложение наступает интенсивно и при более высоких температурах.

2. Кинетические характеристики первого периода разложения древесины сосны

№	Давление Прессования, МПа	Температурный интервал разложения (T_{ext}), °С	Степень конверсии, α	Аппроксимирующая зависимость, (коэффициент корреляции R)	Предэкспоненциальный множитель $\ln A$, c^{-1}	Энергия активации E , Дж/моль
1	0	28-168/(85)	0-0,07	$-6,32 \cdot x + 13,2$ ($R=0,99$)	12,19	52600
2	80	28-168/(86)	0-0,07	$-6,71 \cdot x + 14,3$ ($R=0,99$)	13,35	55800
3	100	28-168/(87)	0-0,07	$-6,87 \cdot x + 14,6$ ($R=0,99$)	13,66	57000
4	120	28-168/(87)	0-0,07	$-6,91 \cdot x + 15$ ($R=0,99$)	13,77	57500

Значение энергии активации в первом периоде для биомассы сосны находится в диапазоне 52,6–57,5 кДж/моль. Прослеживается четкая закономерность между увеличением давления прессования, приростом плотности материала и увеличением энергии активации термического разложения в первом периоде. Значение энергии активации для прессованной биомассы превышает значение для исходного негранулированного сырья на 6–9 %, где большее значение соответствует давлению прессования 120 МПа.

3. Кинетические характеристики второго этапа разложения древесины сосны

№	Давление прессования, МПа	Температурный интервал разложения (T_{ext}), °С	Степень конверсии, α	Аппроксимирующая зависимость, (коэффициент корреляции R)	Предэкспоненциальный множитель $\ln A$, c^{-1}	Энергия активации E , Дж/Моль
1	0	178-335/(315)	0,07-0,56	$-12,5 \cdot x + 20,02$ ($R=0,995$)	18,7	104000
2	80	178-320/(297)	0,715-0,55	$-16,5 \cdot x + 27,2$ ($R=0,98$)	26,2	137000
3	100	178-310/(290)	0,715-0,56	$-18,8 \cdot x + 31,8$ ($R=0,99$)	31,8	156000
4	120	178-295/(290)	0,715-0,55	$-20,3 \cdot x + 35$ ($R=0,99$)	34,8	170000

При дальнейшем повышении температуры до 227...335 °С наблюдался второй период термодеструкции, сопровождающийся большей потерей массы соответствующей преимущественно разложению наименее термостойкой низкокалорийной составляющей биомассы – гемицеллюлозы.

Для линейного участка преимущественного разложения гемицеллюлоз исследуемых образцов так же определены аппроксимирующие уравнения и рассчитаны значения кинетических параметров (табл. 3). Как и в первом периоде, сохраняется закономерность между увеличением давления прессования, приростом плотности материала и увеличением энергии активации термического разложения. Значение энергии активации для измельченной биомассы составляет 104 кДж/моль и повышается для гранул с увеличением давления прессования до 137–170 кДж/моль, что составляет 37–70 %, где большее значение соответствует давлению прессования 120 МПа. Также в прессованном биотопливе наблюдается смещение точки максимума T_{ext} в сторону уменьшения.

Данное явление может оказывать положительный эффект при термической подготовке гранул с целью повышения теплоты сгорания, поскольку содержащиеся в большом количестве полисахаридные комплексы глюкоманнан и арабиногалактан в составе гемицеллюлоз сосновой биомассы затягивают процесс термического разложения в область более высоких температур, что приводит к перекрытию пика разложения целлюлозы пиком разложения гемицеллюлоз [8, 9]. Смещение точки максимума T_{ext} в сторону уменьшения позволяет разделить температурные диапазоны разложения гемицеллюлозы и целлюлозы, тем самым в процессе термообработки минимизировать потерю калорийной составляющей [10].

Термическое разложение образцов при температурах выше 295...335 °С соответствует преимущественно разложению лигниновой составляющей сосны. Аппроксимация линейной зависимостью кривых (рис. 2) в диапазоне температур 335...450 °С позволила получить следующие уравнения регрессии и рассчитанные по ним величины энергии активации: $P=120$ МПа; $y = -3,011x + 5,0899$; $R^2 = 0,9944$; $E = 25,1$ кДж/моль; $P=80$ МПа $y = -3,0301x + 4,9752$; $R^2 = 0,9818$; $E = 25,2$ кДж/моль; $P = 0$ МПа; $y = -3,0148x + 4,7334$; $R^2 = 0,9916$; $E = 25,1$ кДж/моль.

Как видно из уравнений, давление прессования не оказывает влияния на значения энергии активации термического разложения лигниновой составляющей. Отклонение значений энергии активации не превышают 0,5 %. Следовательно, термическая стабильность лигниновой составляющей в данных условиях прессования не повышается. Соответственно в процессе гранулообразования количество молекулярных связей с участием лигнининовой составляющей незначительно, а лигниновая составляющая не имеет определяющего значения при гранулообразовании в данных условиях [11].

Неизотермический анализ разложения гранул биомассы сосны показал, что гранулированное биотопливо обладает более высокой термической стойкостью в диапазоне температур 227...335 °С, и она

возрастает с повышением давления прессования. Исходя из того, что процесс термического разложения представляет собой разрыв физико-химических связей внутри его составляющих с последующим весьма быстрым образованием конечных продуктов разложения, высокие значения энергии активации можно объяснить частичной сшивкой макромолекул полисахаридного комплекса гемицеллюлоз биополимеров, входящих в состав биомассы.

Данное заключение об увеличении числа сшивок и повышении прочности молекулярных связей при прессовании хорошо согласуется с положениями молекулярной теории брикетирования, указанными выше, и свидетельствует об участии полисахаридного комплекса в процессах гранулообразования при низкотемпературном прессовании. Также увеличение значений энергии активации в области десорбции влаги, может свидетельствовать об участии молекул воды в процессе сшивки макромолекул биомассы. Данное явление, как указывалось ранее, также предполагала теория брикетирования.

Выводы и перспективы. С использованием кинетической модели Бройдо получены значения кинетических параметров десорбции влаги и неизотермического разложения гемицеллюлоз для биомассы древесины сосны измельченной и гранулированной при давлении в диапазоне 80–120 МПа.

Установлено, что гранулированное биотопливо обладает более высокой термической стойкостью в периодах десорбции влаги и разложения гемицеллюлоз, и она возрастает с повышением давления прессования. Данное явление объяснено частичной сшивкой макромолекул полисахаридного комплекса биомассы между собой либо через молекулу воды, что подтверждает основные положения молекулярной теории брикетирования.

Установлено, что в процессе гранулообразования количество молекулярных связей с участием лигниновой составляющей незначительно, а лигниновая составляющая при низкотемпературном прессовании не имеет определяющего значения в гранулообразовании.

Также в прессованном биотопливе наблюдается смещение точки максимума T_{ext} в сторону уменьшения. Это явление позволяет предположить, что процесс гранулирования может влиять на температурные диапазоны разложения гемицеллюлозы и целлюлозы, что может быть использовано при термоподготовке биотоплив для уменьшения потери калорийной составляющей.

Результаты выполненных исследований можно использовать при расчетах процессов, связанных с термической подготовкой гранул древесины сосны.

Список литературы

1. Снежкін Ю. Ф. Композиційні палива на основі торфу і рослинної біомаси : монографія / Снежкін Ю. Ф., Корінчук Д. М., Михайлик В. А. – К. : Либідь, 2012. – 211 с.

2. Утгоф С. С. Идентификация химических и механических изменений в уплотненной термомеханическим способом древесине ольхи / С. С. Утгоф // Труды БГТУ. Серия 4: Химия, технология органических веществ и биотехнология. – 2014. – № 4 (168). – С. 124–129.
3. Марьяндышев П. А. Экспериментальное исследование процесса термического разложения биотоплива / П. А. Марьяндышев, А. А. Чернов, Н. В. Шкаева, Л. В. Константинович // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – Т. 2, № 4 (52). – С. 22–25.
4. Марьяндышев П. А. Анализ термогравиметрических данных различных видов древесины / П. А. Марьяндышев, А. А. Чернов, В. К. Любов // Химия твердого топлива. – 2015. – № 2. – С. 59–64.
5. Марьяндышев П. А. Анализ термогравиметрических и кинетических данных различных видов древесного биотоплива Северо-Западного региона Российской Федерации / П. А. Марьяндышев, А. А. Чернов, В. К. Любов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2016. – № 1 (349). – С. 167–182.
6. Наумович В. М. Теоретические основы процесса брикетирования торфа / В. М. Наумович. – Минск : АН БССР, 1960. – 208 с.
7. Broido A. A simple, sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data. // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. – 1969. – Vol. 7, №. 10. – P. 1761–1773.
8. Петрунина Е. А. Термический анализ затопленной древесины / Е. А. Петрунина, С. Р. Лоскутов, А. С. Шишкин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник – 2017. – Т. 21, № 1. – С. 54–63.
9. Терентьева Э. П. Химия древесины, целлюлозы и синтетических полимеров : учеб. пособие / Терентьева Э. П., Удовенко Н. К., Павлова Е. А. – С-Пб. : СПбГТУРП, 2014. – 83 с.
10. Снежкін Ю. Ф. Дослідження режимів термообробки біомаси та торфу у виробництві композиційного біопалива / Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Корінчук, М. М. Безгин // Промислова теплотехніка. – 2017. – Т. 39, №. 1. – С. 53–57.
11. Соловьева Т. В. Превращение компонентов лигноуглеводной матрицы в технологии древесноволокнистых плит : дис. ... д-ра техн. наук : 05.21.03 / Соловьева Т. В. БГТУ. – Минск, 1998. – 259 с.

References

1. Snezhkin, YU. F., Korinchuk, D. M., Mikhaylik, V. A. (2012). Kompozytsiyni palyva na osnovi torfu i roslynnoyi biomasy: syrovyna, vlastyvoli, rezhymy, obladdnannya, tekhnolohiyi: monografiya [Composite fuels based on peat and plant biomass]. K. : Vid-vo "Libid", 211.
2. Utgof, S. S. (2014). Identifikatsiya khimicheskikh i mekhanicheskikh izmeneniy v uplotnennoy termomekhanicheskim metodom drevesinyne olkhi [Identification of chemical and mechanical changes in thermomechanically compacted alder wood]. Trudy BGTU. Seriya 4: Khimiya, tekhnologiyaorganicheskikhveshchestv i biotekhnologiya, 4, (168), 124–129.
3. Maryandyshev, P. A., Chernov A. A., Shkayeva, N. V., Konstantinovich, L. V. (2013). Eksperimentalnoye issledovaniye protsessa termicheskogo razlozheniya biotopliva [Experimental study of the process of thermal decomposition of biofuel]. Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta, 2 (4 (52)), 22–25.
4. Maryandyshev, P. A., Chernov A. A., Lyubov, V. K. (2015). Analiz termogravimetricheskikh dannyykh razlichnykh vidov drevesiny [Analysis of thermogravimetric data of various types of wood]. Khimiya tverdogo topliva, 2, 59–64.

5. Mar'yandyshev, P. A., Chernov, A. A., Lyubov, V. K. (2016). Analiz termogravimetriceskikh i kineticheskikh dannykh razlichnykh vidov drevesnogo biotopliva Severo-Zapadnogo regiona Rossiyskoy Federatsii [Analysis of thermogravimetric and kinetic data of various types of wood biofuel in the North-West region of the Russian Federation]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal, 1 (349), 167–182.
6. Naumovich, V. M. (1960). Teoreticheskiye osnovy briketirovaniya orfa [Theoretical foundations of the peat briquetting process]. Minsk: AN BSSR, 208.
7. Broido, A. (1969). A simple, sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 7 (10), 1761–1773.
8. Petrunina, Ye. A., Loskutov, S. R., Shishikin, A. S. (2017). Termicheskiy analiz zatoplennoy drevesiny [Thermal analysis of flooded wood]. Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin, 21 (1), 54–63.
9. Terentyeva, E. P., Udovenko, N. K., Pavlova, Ye. A. (2014). Khimiya drevesiny, tsellyulozy i sinteticheskikh polimerov: uchebnoye posobiye [Chemistry of wood, cellulose and synthetic polymers]. S-Pb.: SPbGTURP, 83.
10. Snezhkin, Y. F., Korinchuk, D. M., Bezhin, M. M. (2017). Doslidzhennya rezhymiv termoobrobky biomasy ta torfu u vyrobnytstvi kompozytsiynoho biopalyva [Investigation of modes of heat treatment of biomass and peat in the production of composite biofuels]. Promyslova teplotekhnika, 39 (1), 53–57.
11. Solovyeva, T. V. (1998). Prevrashcheniye komponentov lignouglevodnoy matritsy v tekhnologii drevesnovoloknistykh plit [The transformation of the components of the ligno-carbohydrate matrix into the technology of wood fiber boards]. Minsk, 259.

НЕІЗОТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ ІЗ ДЕРЕВИНИ СОСНИ

**Д. М. Корінчук,
К. О. Корінчук**

***Анотація.** Досліджено термічний розклад подрібненої та гранульованої за різних тисків деревини сосни. Міцність міжмолекулярних зв'язків, які виникають у гранульованій біомасі, може відображатися на кінетичних параметрах термічного розкладання біомас. Дослідження впливу тиску пресування на кінетичні характеристики термічного розкладання біомаси дозволить розширити розуміння механізмів гранулоутворення біополімерів.*

Метою дослідження є визначення, з використанням моделі неізотермічної кінетики Бройдо, кінетичних параметрів десорбції фізично зв'язаної вологи і активаційних процесів неізотермічного розкладання геміцелюлози деревної біомаси залежно від тиску пресування.

Проаналізовано термодеструкцію по кінетичній моделі Бройдо зразків біопалив з деревини сосни подрібнених і згранульованих при тиску 80–120 МПа, відібраних на території України. У роботі подано результати розрахунку кінетичних параметрів для стадій десорбції фізично зв'язаної вологи і термічного розкладання геміцелюлоз.

Значення енергії активації десорбції вологи для біомаси сосни знаходиться в діапазоні 52,6–57,5 кДж / моль, де менше значення відповідає подрібненій деревині, а більше – тиску пресування 120 МПа. Розраховано значення кінетичних констант термічного розкладання геміцелюлоз. Значення енергії активації для подрібненої біомаси становить 104 кДж/моль і підвищується для гранул зі збільшенням тиску пресування до 137–170 кДж/моль, що становить 37–70 %, де більше значення відповідає тиску пресування 120 МПа.

Встановлено, що гранульоване біопаливо має більш високу термічну стійкість у періодах десорбції вологи і розкладання геміцелюлоз, і вона зростає з підвищенням тиску пресування. Дане явище пояснено частковою зшивкою макромолекул полісахаридного комплексу біомаси між собою або через молекулу води, що підтверджує основні положення молекулярної теорії брикетування.

Ключові слова: біопаливо, біомаса, сосна, гранулювання, енергія активації, метод неізотермічної кінетики, модель Бройдо

NON-ISOTHERMAL ANALYSIS OF PELLETS FROM PINE WOOD

D. Korinchuk,
K. Korinchuk

Abstract. The article is devoted to the study of the thermal decomposition of milled and granulated pine wood at various pressures. The strength of the intermolecular bonds that arise in granulated biomass can be reflected in the kinetic parameters of the thermal decomposition of biomass. Investigation of the influence of the pressing pressure on the kinetic characteristics of the thermal decomposition of biomass allows broadening the understanding of the mechanisms of biopolymers pellet formation.

The purpose of this paper is to determine the kinetic parameters of desorption of physically bound moisture and to determine activation processes of non-isothermal decomposition of hemicelluloses of wood biomass, depending on the pressing pressure, using the non-isothermal kinetics Broido model.

The work provides an analysis according to the Broido kinetic model of the thermal destruction of biofuel samples from pine wood milled and granulated at a pressure of 80–120 MPa selected over the territory of Ukraine. The results of calculation of kinetic parameters for the stages of desorption of physically-bound moisture and thermal decomposition of hemicelluloses are presented. The value of the activation energy of moisture desorption for pine biomass is in the range of 52.6– 57.5 kJ / mol, where the less value corresponds to milled wood, and the highest value corresponds to the pressing pressure of 120 MPa. The values of the kinetic constants of the thermal decomposition of hemicelluloses are calculated. The value of the activation energy for milled biomass is 104.0 kJ / mol and increases for pellets with an increase of the pressing pressure to 137–170 kJ / mol, which are 37–70%, where a highest value corresponds to a pressing pressure of 120 MPa.

It has been established that granulated biofuel has a higher thermal stability during periods of desorption of moisture and decomposition of hemicelluloses, and it increases with increasing a pressing pressure. This fact is explained by the partial cross-linking of the macromolecules of the polysaccharide biomass complex with each other or through a water molecule, which confirms the main provisions of the molecular theory of briquetting.

Keywords: biofuel, biomass, pine wood, granulation, activation energy, non-isothermal kinetics method, Broido model

УДК 621.314.55(088.8)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА КІЛЬЦЕВИХ МАГНІТОПРОВОДАХ

М. В. БРАГІДА, кандидат технічних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: nni. elektrik@gmail.com

Анотація. *Визначення оптимальних параметрів пристроїв та режимів роботи є однією з основних задач проектування. Найпоширенішими є методи математичного моделювання електричних машин. Сучасне програмне забезпечення дає змогу доволі точно розрахувати електромагнітні процеси та визначити режими роботи. За допомогою комп'ютерної програми Mathcad можна безпосередньо працювати з математичним апаратом, вносити зміни та корективи.*

Метою дослідження є визначення режимів роботи зварювального трансформатора, описаного в [6] за допомогою математичного моделювання, та їх оцінка з результатами дослідження.

За відомими параметрами конструкції зварювального трансформатора та результатами дослідження визначалися індуктивності та активні опори обмоток і розраховувалися струми.

Доцільно математичну модель використовувати для рішення зворотної задачі – знаходження оптимальних параметрів зварювального трансформатора при заданих струмах.

Ключові слова: *зварювальний трансформатор, кільцевий магнітопровід, регулювання струму зварювання, первинна обмотка, вторинна обмотка, комп'ютерна програма Mathcad, система диференціальних рівнянь.*