

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

УДК 549.742.121+662.765

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-440-448>

Поступила в редакцию 23.07.2021

Received 23.07.2021

С. В. Василевич¹, М. В. Малько², Д. В. Дегтеров², А. Н. Асадчий²

¹*Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь*

²*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ
БЕЛОРУССКИХ ДОЛОМИТОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ПРОЦЕССУ РАЗЛОЖЕНИЯ
ПИРОЛИЗНОЙ СМОЛЫ**

Аннотация. Обсуждаются результаты экспериментального исследования термического разложения пиролизной смолы в гомогенном процессе и в присутствии катализатора. Опыты по термическому разложению пиролизной смолы выполнены в изотермических условиях на лабораторной установке при температурах 300, 400, 450 и 500 °С. Определены скорость гомогенного процесса термического разложения смолы и предельные степени разложения. Энергия активации гомогенного процесса по данным настоящей работы составила 320 кДж/моль. Установлено, что скорость термического разложения смолы повышается в случае внесения в реакционную зону образцов природных доломитов, а также композитного материала на их основе. Это повышение обусловлено протеканием гетерогенной каталитической реакции разложения пиролизной смолы. Кажущаяся энергия активации этого процесса составила 210 кДж/моль (при использовании доломитов) и 202 кДж/моль (при использовании композитов). При этом отмечено, что композитный материал обладает значительно более благоприятными механическими свойствами, нежели доломит. На основании установленных данных сделан вывод о перспективности создания композитных катализаторов термического разложения тяжелых углеводородов, образующихся в процессах термохимической конверсии биомассы.

Ключевые слова: пиролизные смолы, доломит, композит, кинетика разложения, энергия активации, предэкспоненциальный фактор

Для цитирования: Каталитические свойства композитного материала на основе белорусских доломитов по отношению к процессу разложения пиролизной смолы / С. В. Василевич [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, №4. – С. 440–448. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-440-448>

Siarhei V. Vasilevich¹, Mikhail V. Malko², Dmitry V. Degterov², Andrei N. Asadchyi²

¹*Belarusian State Aviation Academy, Minsk, Belarus*

²*Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**CATALYTIC PROPERTIES OF A COMPOSITE MATERIAL BASED ON BELARUSIAN DOLOMITES IN
RELATION TO THE DECOMPOSITION OF PYROLYSIS TAR**

Abstract. The paper discusses results of an experimental study of the thermal decomposition of pyrolysis tar in a homogeneous process and in the presence of a catalyst. Experiments on thermal decomposition of pyrolysis tar were carried out under isothermal conditions in a laboratory setup at temperatures of 300, 400, 450 and 500 °C. The rate of the homogeneous process of thermal decomposition of tar and maximal degrees of decomposition were determined. According to the data of this work, the activation energy of the homogeneous process was 320 kJ/mol. It was found that the rate of thermal decomposition of the tar increases in the case of introducing samples of natural dolomites into the reaction zone, as well as a composite material based on them. This increase is due to the occurrence of a heterogeneous catalytic decomposition reaction of the pyrolysis tar. The apparent activation energy of this process was 210 kJ/mol (when using dolomites) and 202 kJ/mol (when using composites). It was noted that the composite material has significantly more favorable mechanical properties than dolomite. Based on the established data, it was concluded that the creation of composite catalysts for the thermal decomposition of heavy hydrocarbons formed in the processes of thermochemical conversion of biomass is promising.

Keywords: pyrolysis tar, dolomite, composite, decomposition kinetics, activation energy, pre-exponential factor

For citation: Vasilevich S. V., Malko M. V., Degterov D. V., Asadchyi A. N. Catalytic properties of a composite material based on belarusian dolomites in relation to the decomposition of pyrolysis tar. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 440–448 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-440-448>

Введение. Пиролиз и газификация растительной биомассы представляют собой новые и многообещающие технологии эффективного ее использования. Согласно данным [1], пиролиз ежегодно прирастающей биомассы позволил бы полностью покрыть потребность в моторном топливе всех существующих на планете двигателей внутреннего сгорания. Применение газификации позволяет получить топливо для газовых турбин, двигателей внутреннего сгорания и других энергетических целей.

Однако существует несколько причин, обусловивших отставание в разработке промышленных установок термохимической конверсии биомассы. В случае процесса газификации основным препятствием является проблема образования смолы, представляющей собой смесь органических веществ. Экспериментальные исследования, выполненные в различных странах мира, показали, что образование компонентов смолы зависит от типа газификаторной установки и температуры процесса газификации [2, 3].

Высокие точки росы компонентов смолы обуславливают отложение этих компонентов на фильтрах, на поверхностях газопроводов и другого оборудования, что в свою очередь приводит к остановке процесса газификации.

Согласно данным [4], при повышении температуры процесса термохимической конверсии биомассы с 400 по 800–1000 °С вклад смолы в суммарные продукты газификации снижается от 20 до ~ 1,5 мас.%. Это снижение сопровождается переходом от соединений с более низкой точкой росы к соединениям с более высокой точкой росы, таким образом, осуществление процесса газификации биомассы в области более высоких температур не решает проблему образования смолы.

Применение катализаторов позволяет обеспечивать процесс разложения смолы при температурах порядка 700–800 °С, то есть не требует дополнительного подогрева продуктов газификации биомассы. Из этого следует, что каталитическое разложение смолы имеет явное преимущество по сравнению с чисто термическим процессом [5].

В качестве перспективных катализаторов разложения смолы специалисты разных стран мира рассматривают природные доломиты, что обусловлено доступностью, дешевизной и каталитической активностью этого минерала по отношению к реакциям термического разложения компонентов пиролизной смолы [6–8]. Беларусь обладает большими запасами доломитов, и это позволяет их использование для очистки продуктов газификации растительной биомассы и других материалов органического происхождения.

Существенным недостатком природных доломитов является пониженная механическая стойкость, что приводит к сильной эрозии и к снижению каталитической активности.

Преодоление данного недостатка доломита, эффективного в процессах разложения пиролизной смолы, позволит создать эффективный и экономически оправданный способ очистки газовой смеси от нежелательных компонентов, образующихся в процессе термохимической конверсии биомассы и других материалов органического происхождения.

Цель исследования – определение каталитической активности композитного материала на основе белорусских доломитов в процессе термического разложения пиролизной смолы, получаемой при термохимической конверсии древесной биомассы.

Методика исследования. Опыты по разложению пиролизной смолы выполнены на лабораторной установке, которая представляет собой высокотемпературный реактор, оснащенный электрическим нагревателем и располагающейся внутри кварцевой бюксой.

Температура в реакционной камере регистрировалась с помощью термопары и измерителя-регулятора температур «Сосна-002», обеспечивающих возможность работы при измерении температур до 1100 °С с точностью измерения до $\pm 0,01$ °С.

В качестве каталитического материала использовались доломит и композитный материал, состоящий из доломита и $\text{Na}_2\text{K}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ в виде порошка с размером гранул около 0,7 мкм. На рис. 1 представлены микрофотографии образцов.

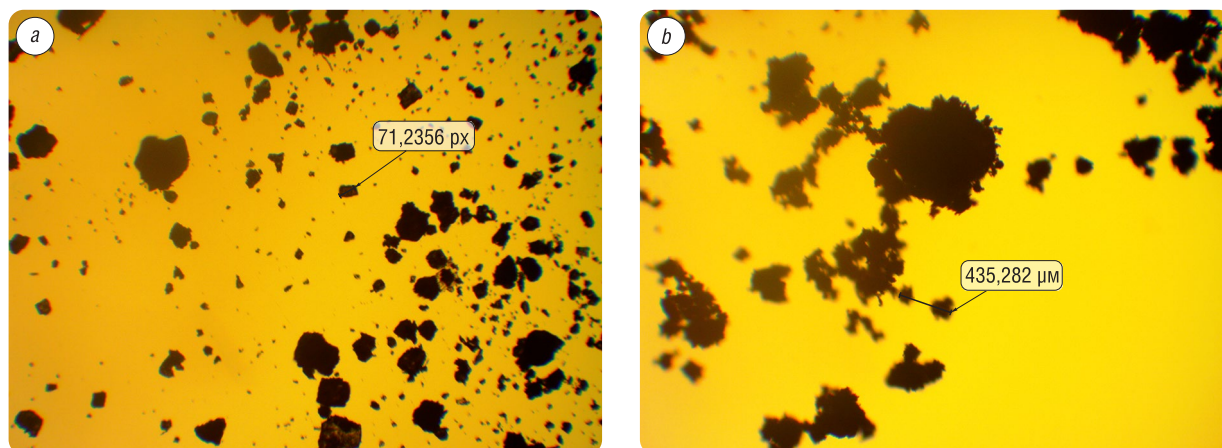


Рис. 1. Микрофотографии образцов доломита (а) и композита (б)

Fig. 1. Micrographs of samples of dolomite (a) and composite (b)

Процесс термохимической конверсии березовой щепы с образованием пиролизной смолы осуществлялся при температуре 600 °С и сопровождался быстрым охлаждением до 200 °С.

Определение состава смолы проводили при помощи обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе высокого давления Shimadzu Prominence LC 20 (Япония) с хроматографической колонкой Nucleodur C18 Gravity (тип C18, размер частиц 5 мкм, длина 25 см) фирмы Macherey-Nagel (Германия).

Плотность смолы была равна 0,9 г/см³. Вязкость определяли на ротационном вискозиметре Brookfield DV2T (США) при температуре 17,1 °С. Измеренное значение составило 395 ± 4 сСт.

Температура вспышки устанавливалась с помощью автоматического аппарата ТВЗ-ЛАБ-11 (Россия) и составила 190 °С. Теплотворная способность смолы определялась на калориметре В-08МА«К» (Россия) и равнялась 28 766,78 кДж/кг (6870,83 кКал/кг).

В опытах образцы смол и каталитический материал (доломит или композит) выдерживались при заданной постоянной температуре. Масса образцов измерялась через определенные промежутки времени на электронных весах РА 214 (Россия) с относительной погрешностью 2 %.

Опыты выполнялись в изотермических условиях при температурах 300, 400, 450 и 500 °С. Образец смолы помещался в кварцевую емкость, располагаемую в реакторе. В случае каталитического разложения смол в кварцевую емкость дополнительно насыпался образец каталитического материала в виде порошка массой около 0,35 г.

Степень протекания реакции определялась по снижению массы образца, выдерживаемого при постоянной температуре.

Результаты исследования и их обсуждение. В табл. 1 представлены результаты определения состава пиролизной смолы, которая образовалась в течение термохимической конверсии березовой щепы при температуре 600 °С.

Анализ данных этой таблицы показывает, что компоненты пиролизной смолы, образовавшейся в процессе термохимической конверсии березовой древесины при температуре 600 °С, соответствуют экспериментальным результатам других исследований [3, 10–12].

Значения степеней разложения смолы (табл. 2–4), установленные в опытах, которые проводились при различных температурах, рассчитаны по формуле

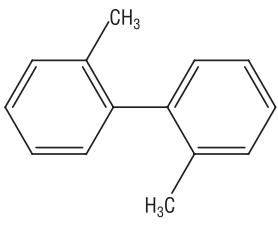
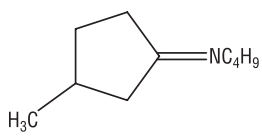
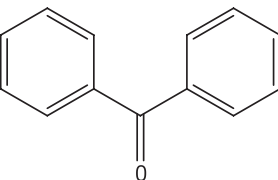
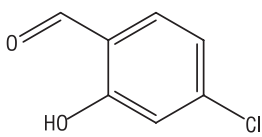
$$X = \frac{m_0 - m_t}{m_0}, \quad (1)$$

где m_0 – исходная масса смолы, г; m_t – масса смолы в момент времени t , г.

На рис. 2 представлены диаграммы степеней разложения смолы при гомогенном процессе, при использовании доломита и композита (доломит с содержанием $\text{Na}_2\text{K}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ около 30 мас.%) при температурах 600 и 700 °С.

Т а б л и ц а 1. Компоненты смолы

T a b l e 1. Tar components

Название соединения	Формула	Содержание, %
2,2-диметил-дифенил		54,95
μ-диокси-бензол	OH-C ₆ H ₄ -HO	9,03
Имин (основание Шиффа) 2-метилциклопентилизо-бутилимин		8,67
бензофенон		7,12
5-хлор-2 гидроксибен-зальдегид		6,81
Бензальдегид	C ₆ H ₄ -CHO	5,59
Имин (основание Шиффа) 2,2-метилпро-пил-изобути-лимин	(CH ₃) ₃ C-CH=NC(CH ₃) ₃	5,53
Бензойный альдегид	C ₆ H ₅ -CHO	2,29

Т а б л и ц а 2. Степени гомогенного разложения пиролизной смолы

T a b l e 2. Degrees of homogeneous decomposition of pyrolysis tar

t, мин	T= 300 °C	T= 400 °C	T= 450 °C	T= 500 °C
0	0	0	0	0
2	0,00833	0,00417	0,00719	0,01191
5	0,00833	0,00833	0,02158	0,04167
10	0,00833	0,00833	0,03597	0,10119
25	0,00833	0,025	0,26619	0,78571
55	0,01042	0,0375	0,46043	0,98809
115	0,01042	0,05	0,57554	0,98809
175	0,01042	0,0625	Нет данных	Нет данных
235	0,01042	0,07083	Нет данных	Нет данных

Т а б л и ц а 3. Степени разложения пиролизной смолы в присутствии доломита

T a b l e 3. Degrees of decomposition of pyrolysis resin in the presence of dolomite

t, мин	T= 300 °C	T= 400 °C	T= 450 °C	T= 500 °C
0	0	0	0	0
2	0	0,0146	0,0139	0
5	0	0,0195	0,0278	0,039526
10	0	0,0244	0,0486	0,711462
20	0,0074	0,0390	0,1806	0,948617
35	0,0074	0,0439	0,4306	0,996047
50	0,0222	0,0781	0,5	0,996047
65	0,0222	0,1366	0,5556	0,996047
85	0,0296	0,1366	0,6181	Нет данных

Т а б л и ц а 4. Степени разложения пиролизной смолы в присутствии композита

T a b l e 4. Degrees of decomposition of pyrolysis resin in the presence of a composite

t, мин	T= 300 °C	T= 400 °C	T= 450 °C	T= 500 °C
0	0	0	0	0
2	0,00699	0,0258	0	0,027586
5	0,01399	0,0568	0,0185	0,062069
10	0,02797	0,0568	0,0741	0,496552
20	0,02797	0,0620	0,1296	0,875862
35	0,02797	0,0620	0,5	0,993103
65	0,02797	0,1189	0,5988	0,993103
125	0,04196	0,3152	0,8889	Нет данных
185	0,04196	0,3463	0,9321	Нет данных

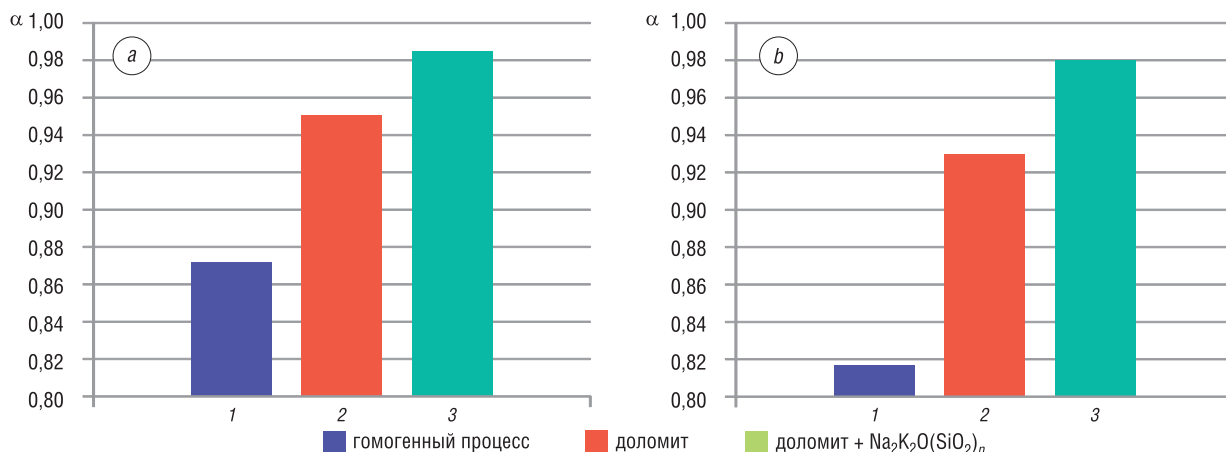


Рис. 2. Диаграммы степеней разложения смолы при гомогенном процессе (1), при использовании доломита (2) и композита (3): *a* – 600 °C, *b* – 700 °C

Fig. 2. Diagrams of the degrees of decomposition of the resin in a homogeneous process (1), when using dolomite (2) and when using a composite (3): *a* – 600 °C, *b* – 700 °C

Как следует из данных рис. 2, присутствие в реакционной зоне природного доломита и композита на его основе повышает степень термического разложения пиролизной смолы при температурах 600 и 700 °C примерно на 10 % по сравнению с опытами, выполненными в гомогенных условиях. Это является доказательством того, что природный доломит и композит на его основе катализируют термическое разложение пиролизной смолы.

Также данные на рис. 2 позволяют сделать вывод о том, что природный доломит и композит на его основе имеют практически одинаковую каталитическую активность по отношению к процессу термического разложения компонентов пиролизной смолы.

При этом, как было установлено в [9], прочность композита, состоящего из доломита (70 мас.%) и $\text{Na}_2\text{K}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ (30 мас.%), в отношении истираемости примерно на два порядка выше, нежели прочность природного доломита. Аналогичным образом композиты на основе природного доломита оказываются намного более прочными по сравнению с прочностью чистых образцов доломита. Пределы прочности их на сжатие примерно на порядок превышают предел прочности чистого доломита.

Кинетика разложения смолы. Анализ установленных и обсуждаемых в настоящей работе данных показал, что кинетика термического разложения смолы может быть описана с приемлемой точностью на основании уравнения, предложенного авторами [13] для описания кинетики реакции термического разложения доломита:

$$(\alpha)^m = kt, \quad (2)$$

где m – некоторый параметр, k – константа скорости, t – время выдержки.

В логарифмической форме уравнение (2) может быть записано в виде

$$\ln(k) = \frac{1}{m} \cdot \ln(t) + \frac{1}{m} \cdot \ln(k). \quad (3)$$

Данные, представленные на рис. 3, показывают зависимость $\ln(\alpha)$ от $\ln(t)$, построенную на основании эмпирических значений степени разложения для гомогенного процесса разложения (*a*), а также в присутствии доломита (*b*) и композита (*c*), при температуре 450 °C.

Использование метода наименьших квадратов дает следующие зависимости для расчета значений α , определенных в настоящей работе при температуре 450 °C для гомогенного процесса разложения смолы (4.1), в присутствии доломита (4.2) и композита (4.3):

$$\ln(\alpha) = 1,374 \cdot \ln(t) - 5,99, \quad R^2 = 0,954; \quad (4.1)$$

$$\ln(\alpha) = 1,125 \cdot \ln(t) - 5,233, \quad R^2 = 0,971; \quad (4.2)$$

$$\ln(\alpha) = 1,212 \cdot \ln(t) - 5,594, \quad R^2 = 0,940. \quad (4.3)$$

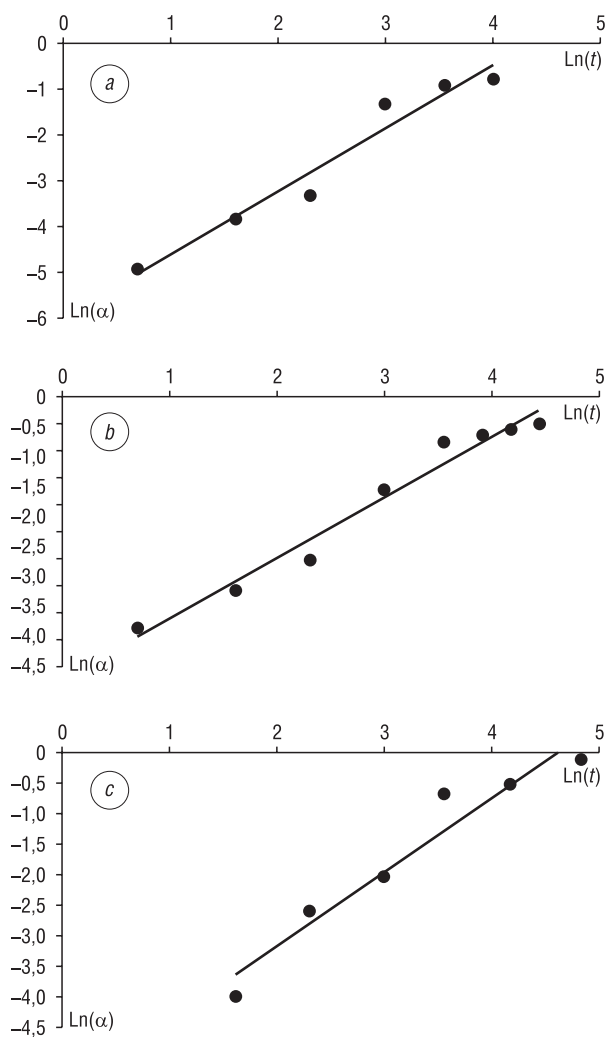


Рис. 3. Графики зависимости $\text{Ln}(\alpha)$ от $\text{Ln}(t)$ для гомогенного процесса разложения (а), а также в присутствии доломита (b) и композита (c) при температуре 450 °C
 Fig. 3. Graphs of dependence $\text{Ln}(\alpha)$ on $\text{Ln}(t)$ for a homogeneous decomposition process (a), as well as in the presence of dolomite (b) and a composite (c) at a temperature of 450 °C

Т а б л и ц а 5. Изменение константы скорости термического разложения пиролизных смол при различных условиях

T a b l e 5. Change in the rate constant of thermal decomposition of pyrolysis resins under various conditions

Условие эксперимента	Константа скорости термического разложения пиролизных смол, k , мин^{-1}			
	при $T=300\text{ °C}$	при $T=400\text{ °C}$	при $T=500\text{ °C}$	при $T=550\text{ °C}$
Гомогенная реакция	$1,802 \cdot 10^{-9}$	$5,35 \cdot 10^{-5}$	0,008643	0,03127
С использованием доломита	$7,27 \cdot 10^{-5}$	$6,12 \cdot 10^{-4}$	0,009547	0,05808
С использованием композита	$5,87 \cdot 10^{-7}$	$6,24 \cdot 10^{-4}$	0,009897	0,02166

Аналогичные результаты были установлены также для опытных данных, определенных при других температурах для значений α , соответствующих протеканию гомогенной и каталитической реакций разложения пиролизных смол.

В табл. 5 представлены значения констант скорости гомогенного процесса разложения смол, а также в присутствии доломита и композита, установленные при использовании соотношения (2).

Аррениусовские зависимости логарифмов констант скорости гомогенного и каталитического разложения смолы, значения которых приведены в табл. 4, от обратной величины температуры показаны на рис. 4.

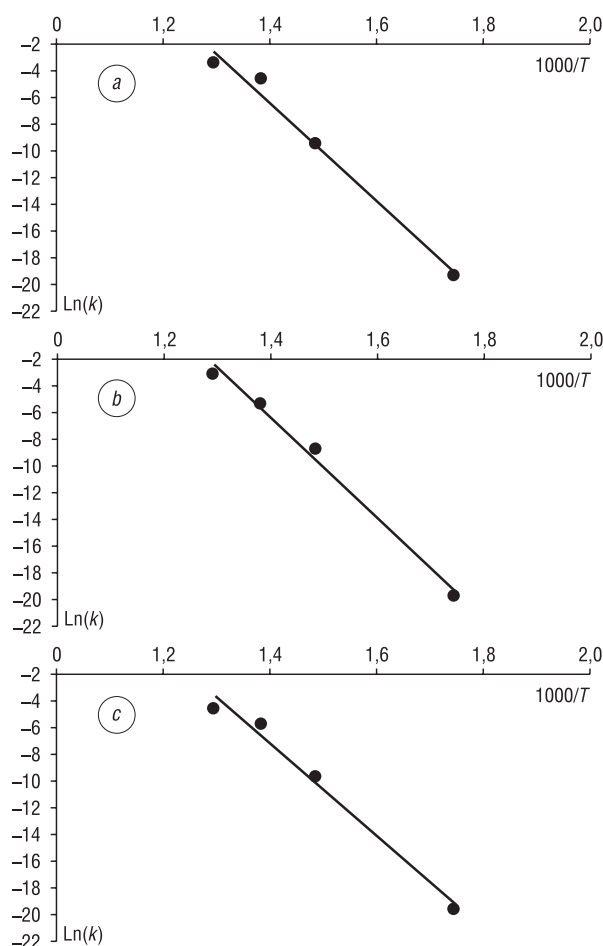


Рис. 4. Аррениусовские зависимости логарифмов констант скорости гомогенного и каталитического разложения смолы от обратной величины температуры для гомогенного процесса разложения (а), а также в присутствии доломита (b) и композита на его основе (c)

Fig. 4. Arrhenius dependences of the logarithms of the rate constants of the resin on the reciprocal of the temperature for the homogeneous decomposition process (a), as well as in the presence of dolomite (b) and composite based on it (c)

Аппроксимация методом наименьших квадратов значений константы скорости термического разложения смолы, представленных в табл. 4, дает следующие зависимости:

$$\ln(k) = -38,51 \cdot \frac{1000}{T} + 47,33, R^2 = 0,985, \quad (5.1)$$

$$\ln(k) = -25,33 \cdot \frac{1000}{T} + 30,15, R^2 = 0,998, \quad (5.2)$$

$$\ln(k) = -24,31 \cdot \frac{1000}{T} + 28,37, R^2 = 0,982. \quad (5.3)$$

Коэффициент, стоящий перед обратной температурой в выражениях (5.1)–(5.3), характеризует угол наклона зависимости, представленной на рис. 4. Умножение этого коэффициента на газовую постоянную $R = 8,314$ Дж/(моль·К) и фактор 1000 устанавливает энергию активации E реакции: 320 ± 16 кДж/моль – для гомогенного процесса, 211 ± 10 кДж/моль – при использовании доломита, 202 ± 10 кДж/моль – при использовании композитного материала.

Энергия активации каталитического разложения смолы (с применением доломита и композита) примерно на 100 кДж/моль меньше, чем энергия активации гомогенного процесса, что является свойством катализаторов. Внесение их в зону протекания реакции приводит к снижению кажущейся энергии активации и позволяет осуществлять процесс в области более низких температур, что, в частности, является необходимым условием очистки продуктов термохимической конверсии биомассы от смол.

Между тем значения коэффициента истираемости композита доломита примерно в 100 раз меньше, нежели коэффициент истираемости чистого природного доломита. Это сравнение показывает на возможность практического решения проблемы, связанной с использованием природных доломитов для каталитической очистки пиролизных продуктов.

Заключение. Результаты экспериментального исследования, выполненного в изотермических условиях на лабораторной установке при температурах 300, 400, 450 и 500 °С, показали, что композитный материал на основе природных доломитов Беларуси (доломит с содержанием $\text{Na}_2\text{K}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ около 30 мас.%), имеет практически одинаковую каталитическую активность по сравнению с образцами природного доломита в отношении реакции термического разложения тяжелых углеводородов, образующихся в процессе термохимической конверсии биомассы.

Установлено, что прочностные характеристики композита на основе природного доломита существенно выше, нежели эти же характеристики чистых образцов природного доломита.

Полученные результаты позволяют заключить, что использование изученных в настоящей работе композитов на основе природных доломитов помогает решить основную проблему использования доломитов в качестве катализаторов разложения нежелательных компонентов пиролизной смолы. Практическая важность установленных результатов указывает на необходимость дальнейших исследований композитных образцов с целью создания недорогих и эффективных катализаторов очистки продуктов термохимической конверсии биомассы.

Список использованных источников

1. Bridgwater, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass / A. V. Bridgwater // Chem. Eng. J. – 2003. – Vol. 91, № 1–2. – P. 87–102. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0)
2. Milne, T. A. Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation and Conversion [Electronic resource] / T. A. Milne, N. Abatzoglou, R. J. Evans. – NREL Technical Report (NREL/TP-570-25357), November 1998. – Mode of access: <https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25357.pdf> – Date of access: 10.11.2020.
3. Evans, R. J. Molecular Characterization of the Pyrolysis of Biomass. 1. Fundamentals / R. J. Evans, T. A. Milne // Energy & Fuels. – 1987. – Vol. 1, № 2. – P. 123–138. <https://doi.org/10.1021/ef00002a001>
4. Characterization and Treatment of Tars from Biomass Gasifiers / E. G. Baker [et al.] // AIChE 1988: Summer National Meeting, Denver, Colorado. August 21–24, 1988. – Denver, 1988. – P. 1–11.

5. Sutton, D. Review of literature on catalysts for biomass gasification / D. Sutton, B. Kelleher, J.R. H. Ross // *Fuel Processing Technology*. – 2001. – Vol. 73, №3. – P. 155–173. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00208-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00208-9)
6. Núñez-Castaño, S. A. Evaluation of dolomite as catalyst in the transesterification reaction using palm oil (RBD) / S. A. Núñez-Castaño, D. O. Villamizar-Castro, E. M. Vargas-Solano // *DYNA*. – 2019. – Vol. 86, №209. – P. 180–187. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.74126>
7. Biomass Gasification with Dolomite as Catalyst in a Small Fluidized Bed Experimental and Modelling Analysis / M. Baratieri [et al.] // *Waste and Biomass Valorization*. – 2010. – Vol. 1, №3. – P. 283–291. <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-010-9034-6>
8. Effects of Chinese dolomites on tar cracking in gasification of birch / Q.Z. Yu [et al.] // *Fuel*. – 2009. – Vol. 88, №10. – P. 1922–1926. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.04.020>
9. Study of the catalytic activity of natural minerals and composites based on them in process of pyrolytic tar decomposition / S. V. Vasilevich [et al.] // 15th International Conference of Young Scientists on Energy Issues, May 23–25, 2018, Lithuanian energy institute, Launas, Lithuania (in print).
10. Garcia-Perez, M. The formation of Polyaromatic Hydrocarbons and Dioxins During Pyrolysis: A Review of the Literature with Descriptions of Biomass Composition, Fast Pyrolysis Technologies and Thermochemical Reactions. Technical Report [Electronic resource] / M. Garcia-Perez, J. Metcalf. – Washington State University, 2008. – 63 p. – Mode of access: <http://www.pacificbiomass.org/documents/TheFormationOfPolyaromaticHydrocarbonsAndDioxinsDuringPyrolysis.pdf> – Date of access: 10.11.2020.
11. Dayton, D. A Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. Milestone Completion Report [Electronic resource] / D. Dayton // NREL/TP-510-32815. – 2002. – 27 p. – Mode of access: <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32815.pdf> – Date of access: 10.11.2020.
12. El-Rub, Z. A. Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification / Z. A. El-Rub, E. A. Bramer, G. Brem // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2004. – Vol. 43, №22. – P. 6911–6919.
13. Исследование кинетики термического разложения белорусских доломитов / М. В. Малько [и др.] // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2015. – №1. – С. 95–101.

References

1. Bridgwater A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 2003, vol. 91, no. 1–2, pp. 87–102. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0)
2. Milne T. A., Abatzoglou N., Evans R. J. *Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation and Conversion*. NREL Technical Report (NREL/TP-570-25357), November 1998. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25357.pdf> (accessed 10 November 2020).
3. Evans R. J., Milne T. A. Molecular Characterization of the Pyrolysis of Biomass. 1. Fundamentals. *Energy & Fuels*, 1987, vol. 1, no. 2, pp. 123–138. <https://doi.org/10.1021/ef00002a001>
4. Baker E. G., Brown M. D., Elliott D. C., Mudge L. K. Characterization and Treatment of Tars from Biomass Gasifiers. *AIChE 1988: Summer National Meeting, Denver, Colorado. August 21–24, 1988*. Denver, 1988, pp. 1–11.
5. Sutton D., Kelleher B., Ross J. R. H. Review of literature on catalysts for biomass gasification. *Fuel Processing Technology*, 2001, vol. 73, no. 3, pp. 155–173. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00208-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00208-9)
6. Núñez-Castaño S. A., Villamizar-Castro D. O., Vargas-Solano E. M. Evaluation of dolomite as catalyst in the transesterification reaction using palm oil (RBD). *DYNA*, 2019, vol. 86, no. 209, pp. 180–187. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.74126>
7. Baratieri, M., Pieratti, E., Nordgreen, T., Grigante M. Biomass Gasification with Dolomite as Catalyst in a Small Fluidized Bed Experimental and Modelling Analysis. *Waste and Biomass Valorization*, 2010, vol. 1, no. 3, pp. 283–291. <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-010-9034-6>
8. Yu Q. Z., Brage C., Nordgreen T., Sjöström K. Effects of Chinese dolomites on tar cracking in gasification of birch. *Fuel*, 2009, vol. 88, no. 10, pp. 1922–1926. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.04.020>
9. Vasilevich S. V., Asadchyi A. N., Malko M. V., Degterov D. V. Study of the catalytic activity of natural minerals and composites based on them in process of pyrolytic tar decomposition. *15th International Conference of Young Scientists on Energy Issues, May 23–25, 2018*. Kaunas, Lithuania: Lithuanian Energy Institute, 1–1–8.
10. Garcia-Perez M., Metcalf J. *The formation of Polyaromatic Hydrocarbons and Dioxins During Pyrolysis: A Review of the Literature with Descriptions of Biomass Composition, Fast Pyrolysis Technologies and Thermochemical Reactions. Technical Report*. Washington State University, 2008. Available at: <http://www.pacificbiomass.org/documents/TheFormationOfPolyaromaticHydrocarbonsAndDioxinsDuringPyrolysis.pdf> (accessed 10 November 2020).
11. Dayton D. *A Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. Milestone Completion Report*. NREL/TP-510-32815. National Renewable Energy Laboratory, 2002. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32815.pdf> (accessed 10 November 2020).
12. El-Rub Z. A., Bramer E. A., Brem G. Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004, vol. 43, no. 22, pp. 6911–6919. <https://doi.org/10.1021/ie0498403>
13. Malko M. V., Vasilevich S. V., Bogach V. N., Degterev D. V. Study of the kinetics of thermal decomposition of Belarusian dolomites. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 1, pp. 95–101.

Информация об авторах

Василевич Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Малько Михаил Владимирович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mikhailvm@bas-net.by

Дегтеров Дмитрий Валентинович – старший научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ddegterov@mail.ru

Асадчий Андрей Николаевич – научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: asadchyi@tut.by

Information about the authors

Siarhei V. Vasilevich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian State Aviation Academy (77, Uborevich Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Mikhail V. Malko – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mikhailvm@bas-net.by

Dmitry V. Degterov – Senior Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ddegterov@mail.ru

Andrei N. Asadchyi – Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: asadchyi@tut.by