

a laboratory setup under isothermal conditions at temperatures of 300, 350, and 400 °C by two methods providing two-phase and three-phase contact with the catalyst, respectively. It has been established that the rate of decomposition of pyrolysis tar under the studied conditions obeys the laws described by the Avrami–Erofeev equation with a variable exponent n . The area of change of this indicator in various experiments includes values from 0.415 to 1.238. The mean n value calculated for all study options was 0.694 (95 % CI 0.605 to 0.783), and the median value was 0.639. It has been found that the decomposition rate of the pyrolysis tar increases when MOX particles, potassium sulfate, and magnesium sulfate are introduced into the reaction zone. No effect of monopotassium phosphate on the rate of decomposition of the pyrolysis tar was not found. It is shown that in the case of tailings of potassium salts production an increase in the rate of decomposition of pyrolysis tar is due to the catalytic effect of this substance. The most likely reason for the positive effect of potassium sulfate, as well as magnesium sulfate on the rate of decomposition of pyrolysis tar, is apparently also the catalytic effect of these substances. The Arrhenius parameters of the homogeneous process of thermal decomposition of the pyrolysis tar and the decomposition process in the presence of tailings of potassium salts production, as well as potassium and magnesium sulfates, were determined. According to the data obtained, the activation energy of the homogeneous process was 29.6 kJ/mol, and the pre-exponential factor was $3.15 \cdot 10^1 \text{ min}^{-1}$, respectively. The Arrhenius parameters of the decomposition of pyrolysis tar in the presence of tailings of potassium salts production, according to the data of the performed studies, were 23.0 kJ/mol and $1.82 \cdot 10^1 \text{ min}^{-1}$. The paper also determined the Arrhenius parameters of the decomposition of pyrolysis tar in the presence of K_2SO_4 and MgSO_4 . According to estimates, the activation energy in the presence of these substances was about 50–60 kJ/mol. The research results presented in the article can be used in the design of heat generating equipment, which includes a system for cleaning products of thermochemical conversion of vegetable raw materials.

Keywords: pyrolysis tar, potassium sulfate, magnesium sulfate, monopotassium phosphate, potash production waste, decomposition kinetics, activation energy, pre-exponential factor

For citation: Malko M. V., Dobrego K. V., Vasilevich S. V., Degterov D. V. Catalytic properties of some mineral salts in relation to the process of decomposition of pyrolysis tar. *Vestsi Natsyynal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 379–392 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-379-392>

Введение. Исследования диверсификации энергоресурсов, в том числе за счет использования новых видов топлива и/или улучшения характеристик традиционных топлив, представляют значительный интерес для энергетики. Перспективным направлением исследований и разработок этих вопросов является развитие тепловых электростанций относительно небольшой мощности, использующих различные виды местного топлива [1–3]. Такие объекты малой энергетики, как правило, ориентируются на получение генераторного газа, а не на непосредственное сжигание топлива [3–5]. При этом их эффективность существенно ограничивается несовершенством процесса очистки от смол и охлаждения генераторного газа. По данным [3, 4] стоимость аппаратов кондиционирования генераторного газа, получаемого из местных видов топлива, составляет до 15–20 % от общей стоимости строительства теплоэлектростанций с парогазовыми установками.

Необходимость использования систем очистки продуктов термохимической конверсии биомассы и материалов органического происхождения обусловлена образованием в таких процессах органических веществ, образующих пиролизную смолу. В состав пиролитической смолы, как известно, входят различные полициклические соединения, имеющие низкую точку росы. Они отлагаются на поверхностях с температурой ниже точки росы [5]. Это приводит к забивке фильтров и арматуры на линии перекачки смеси, которая образовалась в процессе термохимической конверсии вещества, что может спровоцировать остановку всего рабочего процесса. Возможным путем решения этой проблемы является использование катализаторов, обеспечивающих ускоренный процесс разложения пиролизных смол при температурах порядка 700–800 °C. Применение каталитического метода очистки продуктов термохимической конверсии биомассы и отходов биологического происхождения не требует дополнительного подогрева для разложения нежелательных продуктов конверсии с целью повышения скорости гомогенных процессов разложения этих продуктов. Это является преимуществом каталитической очистки продуктов термохимической конверсии биомассы и материалов органического происхождения по сравнению с гомогенными процессами [6]. Результаты исследований, посвященных применению катализаторов в специфических термохимических процессах, таких как термическое разложение смол, образующихся в процессе пиролиза биомассы, обсуждаются, в частности, в [7–9].

К настоящему времени выполнено большое количество работ по катализу в нефтехимии, окислительному катализу. Установлены достаточно четкие представления о механизмах катализа, структуре и составу оптимальных катализаторов (например, работы Института катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук) [10]. Следует отметить, что для малых энергетических технологий, для местной промышленности Беларуси (а именно

они находятся в фокусе настоящего исследования) важным фактором является дешевизна и доступность каталитических материалов. И здесь открывается широкое поле для поиска и исследования доступных минеральных материалов. Безусловно, первая стадия исследований должна включать экспериментальное тестирование разнообразных минеральных материалов с целью выявления их каталитических свойств.

В [11–14] исследованы каталитические свойства доломита. Анализ данных [12, 13] показал, что хотя доломит по своим каталитическим свойствам не уступает таким катализаторам разложения углеводородов, как Ni, Ru, Rh, Pt, однако он имеет существенный недостаток – понижение механических свойств при нагреве, что приводит к сильной эрозии и снижению каталитической активности.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования некоторых минеральных материалов, доступность которых обусловлена их применением в крупнотоннажном производстве для сельскохозяйственных целей. Это соли, входящие в состав минеральных удобрений: сульфат калия, сульфат магния, монокалийфосфат, а также минеральные остатки производства калийных солей (МОКС).

Цель исследования – определение каталитической активности входящих в состав минеральных удобрений солей: сульфата калия, сульфата магния, монокалийфосфата, а также минеральных остатков производства калийных солей (МОКС) по отношению к процессу термического разложения пиролитической смолы, образующейся в термохимической конверсии древесной биомассы.

Методика исследования. Изучение термохимических, в том числе каталитических, процессов могут быть проведено как в изотермических, так и в неизотермических условиях. В настоящей работе приведены результаты экспериментов, выполненных в изотермических условиях. Такой выбор условий обусловлен тем, что указанные условия позволяют сократить число показателей, подлежащих определению. Это упрощает анализ получаемых экспериментальных данных, что в итоге приводит к более точному установлению кинетических параметров термохимического процесса.

Используемые в исследовании сульфат магния и монокалийфосфата представляют собой удобрение, выпускаемое ОАО «Буйский химический завод» (Российская Федерация). Сульфат калия – минеральное удобрение, производимое в ОАО «Белреахим» (Республика Беларусь).

МОКС получены на четвертом руднике ОАО «Беларускалий» (Республика Беларусь) и представляют собой дисперсный материал с размером фракций 1–3 мм. В табл. 1 приведен элементный состав МОКС, установленный с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMN (Чешская Республика).

Т а б л и ц а 1. Элементный состав МОКС
Table 1. Elemental composition of tailings of potassium salts production

Показатель	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Br
Макс, %	15,08	5,94	34,41	0,78	0,62	2,54	0,29	56,94	44,61	4,74	2,60	0,42
Мин, %	3,72	2,12	3,80	0,58	0,09	0,27	0,29	43,42	0,47	0,93	2,60	0,42
Средний, %	–	4,18	19,78	–	–	–	–	52,78	13,67	–	–	–
Стандартное отклонение, %	–	1,60	13,32	–	–	–	–	6,33	20,84	–	–	–

Каталитические свойства указанных минеральных веществ были изучены в процессе разложения жидкой пиролитической смолы, образовавшейся в процессе термохимической конверсии при температуре 600 °С березовой щепы и последующего быстрого охлаждения полученного продукта до 200 °С.

Плотность полученной смолы составила 0,9 г/см³, вязкость – 395 ± 4 сСт. Вязкость определяли на ротационном вискозиметре Brookfield DV2T (США) при температуре 17,1 °С. Температура вспышки фиксировалась с помощью автоматического аппарата ТВЗ-ЛАБ-11 (Российская Федерация) и составила 190 °С. Теплотворная способность смолы, которая определялась на калориметре В-08МА«К» (Российская Федерация), равнялась 28766,78 кДж/кг (6870,83 кКал/кг).

Скорость термического гомогенного разложения пиролитической смолы устанавливалась следующим образом. Образец смолы массой около 2 г наливался в лабораторную керамическую емкость и помещался в печь SNOL7,2/1300 (ОАО «Умега», Российская Федерация), позволяющую поддерживать постоянную температуру среды до 1300 °С с точностью ± 2 °С. Образцы смол выдерживались при заданной постоянной температуре. После выдержки в течение установленного периода времени кювета извлекалась из печи и взвешивалась на электронных весах Pioneer PA214C 210/0.1mg (OHAUS Corporation, США) с дискретностью 0,1 мг.

Опыты по термокаталитическому разложению пиролитической смолы выполнялись аналогичным образом. При этом использовались два метода: первый обеспечивал преимущественно двухфазный контакт смолы и катализатора, второй – трехфазный контакт смола–катализатор–воздух. В первом случае в лабораторную емкость, содержащую пиролизную смолу, насыпался каталитический материал в виде порошка в массовом соотношении смола/катализатор равном 2.

При использовании второго метода смола заливалась в лабораторную емкость, в которую затем погружался пропитанный смолой пористый инертный материал (газосиликат в виде диска диаметром 35 мм и толщиной 3 мм). При этом верхняя грань диска оставалась непропитанной. В случае гомогенного процесса лабораторная емкость с пропитанным смолой газосиликатным диском помещалась в печь и выдерживалась при заданной постоянной температуре, после чего производилось взвешивание. В условиях каталитического процесса исследуемый каталитический материал насыпался на поверхность газосиликатного диска. При этом данный материал вначале напрямую не касался смолы. Однако при нагревании смола пропитала пористую инертную подкладку, разлагалась и таким образом контактировала и с каталитическим материалом, и с воздухом, что затруднено в опытах, проводимых по первому методу. Исходя из этого можно предположить, что проводимые по второму методу опыты более адекватны условиям, которые могут быть реализованы в пиролизном аппарате.

Исследования выполнялись при температурах 300, 350 и 400 °С. При более высоких температурах эксперименты не проводились, так как смола начинала гореть, что усложняло проведение замеров.

Результаты исследования и их обсуждение. Значения степеней разложения смолы, установленные в опытах, которые проводились при различных температурах и условиях, были рассчитаны по формуле

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

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

В табл. 2–5 приведены экспериментальные значения степени термического разложения пиролитической смолы, установленные в выполненных исследованиях.

Значения степеней разложения пиролитической смолы в различные моменты времени, полученные при использовании второго метода исследования, представлены также на рис. 1–3.

Как следует из рассмотрения данных, приведенных в табл. 2–5 и на рис. 1–3, присутствие МОКС, MgSO_4 и K_2SO_4 в реакционной зоне приводит к существенному повышению степени разложения пиролитической смолы по сравнению с чисто гомогенным процессом. При этом влияние указанных веществ на кинетику термического разложения пиролитической смолы оказывается зависящим от температуры. Так, по данным, представленным на рис. 1, самое высокое значение степени разложения пиролитической смолы при температуре 300 °С было достигнуто в присутствии МОКС. Присутствие в реакционной зоне K_2SO_4 также привело к росту степени разложения пиролитической смолы, хотя и в не такой степени, как присутствие МОКС.

Практически никакого влияния на кинетику термического разложения пиролитической смолы при температуре 300 °С не оказал сульфат магния. Однако при температуре 350 °С, как это видно из рис. 2, это соединение продемонстрировало активность, практически не отличимую от активности, МОКС и сульфата калия.

Т а б л и ц а 2. Степени гомогенного разложения пиролизической смолы α_t T a b l e 2. Homogeneous decomposition degrees of pyrolysis tar, α_t

t , мин	Первый метод			Второй метод		
	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$
1	0,0112	0,0072	0,0073	0,0099	0,0058	0,0061
3	0,0729	0,0509	0,3471	0,0712	0,0478	0,3095
5	0,2311	0,4599	0,8266	0,1514	0,2995	0,786
10	0,4630	0,7648	0,9083	0,3982	0,7957	0,9159
15	0,6143	–	0,9376	0,5807	0,8918	0,9581

Т а б л и ц а 3. Степени разложения пиролизической смолы α_t в присутствии сульфата калия K_2SO_4 (33 %)T a b l e 3. Degrees of decomposition of pyrolysis, α_t , tar in the presence of potassium sulfate K_2SO_4 (33 %)

t , мин	Первый метод			Второй метод		
	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$
1	0,0098	0,0372	0,2886	0,0074	0,0198	0,1958
3	0,1168	0,6392	0,8599	0,1035	0,5192	0,8079
5	0,3324	0,7558	0,9133	0,5004	0,8916	0,9816
10	0,5334	–	0,9750	0,6915	0,9158	0,99
15	0,5883	–	–	0,7871	–	–
20	0,5902	–	–	0,89	–	–

Т а б л и ц а 4. Степени разложения пиролизической смолы α_t в присутствии сульфата магния MgSO_4 (33 %)T a b l e 4. Degrees of decomposition of pyrolysis tar, α_t , in the presence of magnesium sulfate MgSO_4 (33 %)

t , мин	Первый метод			Второй метод		
	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$
1	0,0128	0,0379	0,1510	0,0119	0,04014	0,0994
3	0,0814	0,6366	0,7846	0,0792	0,6032	0,7053
5	0,2641	0,8513	0,9274	0,142	0,8916	0,9866
10	0,4859	0,8565	0,9844	0,4693	0,9019	0,9901
15	0,5875	–	0,9908	0,591	0,9712	0,9908
20	0,6661	–	–	0,7013	–	–

Т а б л и ц а 5. Степени разложения пиролизической смолы α_t в присутствии МОКС (33 %)T a b l e 5. Degrees of decomposition of the pyrolysis tar, α_t , in the presence of tailings of the production of potash fertilizers (33 %)

t , мин	Первый метод			Второй метод		
	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$
1	0,0257	0,0274	0,0343	0,0272	0,0256	0,1664
3	0,1258	0,4836	0,8076	0,16052	0,5076	0,5165
5	0,4353	0,9163	0,9122	0,4931	0,9278	0,8568
10	0,7873	0,9405	0,9742	0,8522	0,9350	0,9931
15	0,9969	0,9476	0,9985	0,9839	0,9406	–

При температуре $400\text{ }^\circ\text{C}$ активность MgSO_4 , как это следует из рис. 3, оказалась практически равной активности K_2SO_4 . Эти соединения, как можно видеть, оказались более активными в отношении термического разложения пиролизической смолы, нежели МОКС.

Не было обнаружено влияния монокалийфосфата на кинетику разложения пиролизической смолы. Это вещество спекается при температуре порядка $300\text{ }^\circ\text{C}$, образуя стекловидную массу, которая не проявляет ни положительного, ни отрицательного воздействия на скорость разложения пиролизической смолы в условиях выполненных опытов.

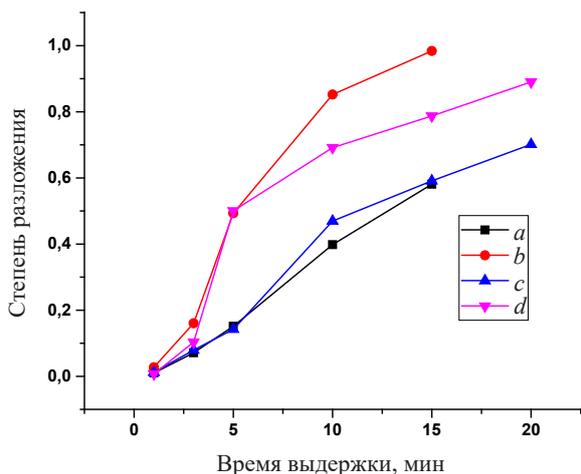


Рис. 1. Термическое разложение пиролизной смолы при температуре 300 °С: *a* – гомогенный процесс, *b* – в присутствии МОКС, *c* – в присутствии MgSO₄, *d* – в присутствии K₂SO₄

Fig. 1. Thermal decomposition of pyrolysis tar at a temperature of 300 °C: *a* – homogeneous process, *b* – in the presence of tailings of potassium salts production, *c* – in the presence of MgSO₄, *d* – in the presence of K₂SO₄

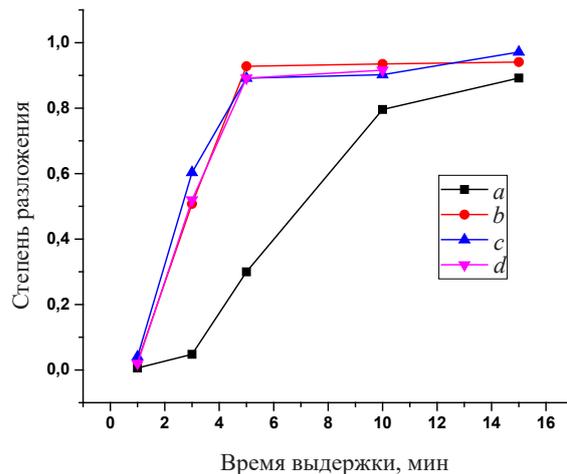


Рис. 2. Термическое разложение пиролизной смолы при температуре 350 °С: *a* – гомогенный процесс, *b* – в присутствии МОКС, *c* – в присутствии MgSO₄, *d* – в присутствии K₂SO₄

Fig. 2. Thermal decomposition of pyrolysis tar at a temperature of 350 °C: *a* – homogeneous process, *b* – in the presence of tailings of potassium salts production, *c* – in the presence of MgSO₄, *d* – in the presence of K₂SO₄

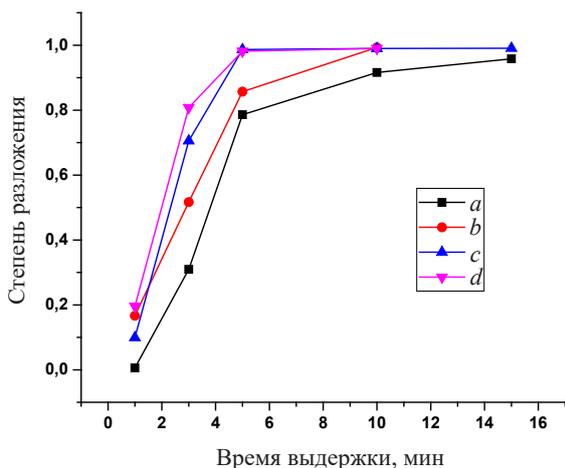


Рис. 3. Термическое разложение пиролизной смолы при температуре 400 °С: *a* – гомогенный процесс, *b* – в присутствии МОКС, *c* – в присутствии MgSO₄, *d* – в присутствии K₂SO₄

Fig. 3. Thermal decomposition of pyrolysis tar at a temperature of 400 °C: *a* – homogeneous process, *b* – in the presence of tailings of potassium salts production, *c* – in the presence of MgSO₄, *d* – in the presence of K₂SO₄

Показатель *n* позволяет получить набор значений констант скорости разложения пиролизной смолы. Этот набор констант скорости необходимо аппроксимировать линейным уравнением

$$Y = A + Bx. \quad (4)$$

В случае ошибочного значения заданного показателя *n* линейная аппроксимация приводит к расчетным значениям констант скорости, которые изменяются с течением времени. Данное обстоятельство указывает на то, что заданное значение показателя *n* не соответствует кинетике

Кинетика разложения смолы. Анализ данных показал, что кинетика термического разложения пиролизной смолы в условиях выполненных исследований определяется уравнением Авраами–Ерофеева

$$[-\ln(1 - \alpha_t)]^n = kt, \quad (2)$$

где *n* – некоторый показатель, *k* – константа скорости формальной реакции разложения вещества, *t* – время выдержки образца при температуре разложения.

В табл. 6 представлены значения показателя *n*, определенные для всех изученных вариантов экспериментального исследования.

Данные значения показателя *n* были определены с помощью итеративной методики. Ее суть состоит в следующем.

Уравнение (2) можно разрешить относительно константы скорости реакции

$$k = \frac{1}{t} [-\ln(1 - \alpha_t)]^n. \quad (3)$$

Подстановка значений степени разложения α_t , соответствующих времени выдержки *t*, в выражение (3) и некоторых начальных значений показателя *n*

Т а б л и ц а 6. Значения показателя *n* уравнения Аврами–Ерофеева для процесса термического разложения пиролизической смолы

T a b l e 6. Values of the exponent *n* of the Avrami–Erofeev equation for the process of thermal decomposition of pyrolysis tar

Показатель	Первый метод			Второй метод		
Гомогенный процесс						
<i>t</i> , °C	300	350	400	300	350	400
<i>n</i>	0,621	0,415	0,610	0,616	0,440	0,542
Разложение в присутствии K ₂ SO ₄						
<i>t</i> , °C	300	350	400	300	350	400
<i>n</i>	0,667	0,445	1,110	0,553	1,238	0,553
Разложение в присутствии MgSO ₄						
<i>t</i> , °C	300	350	400	300	350	400
<i>n</i>	0,656	0,739	0,996	0,622	0,852	0,922
Разложение в присутствии МОКС						
<i>t</i> , °C	300	350	400	300	350	400
<i>n</i>	0,495	0,775	0,746	0,539	0,830	0,681

процесса. Следовательно, требуется другое значение этого показателя. Такие расчеты повторяются до тех пор, пока не будет подобран такой показатель *n*, при котором линейная аппроксимация графика констант скорости позволит получить выражение, не зависящее от времени протекания реакции.

Пример корректного выбора показателя *n* на основе описанной итеративной процедуры представлен на рис. 4.

Точки на рис. 4 показывают экспериментальные значения константы скорости разложения пиролизической смолы, рассчитанные по выражению (3) с использованием показателя *n*, равного 0,621, а прямая линия, параллельная оси абсцисс, дает усредненное значение константы скорости, определяемое линейной аппроксимацией этих экспериментальных величин:

$$Y = 0,07118 - 1,35228 \cdot 10^{-5}X, r = -0,00749, p = 0,99046. \tag{5}$$

Здесь *r* – коэффициент корреляции, а *p* – статистический параметр, определяющий близость к нулю коэффициента корреляции.

Как следует из результатов линейной аппроксимации, использование показателя *n*, равного 0,621, привело к значению коэффициента корреляции, близкому к нулю. Такой же результат установлен для коэффициента *B* линейного уравнения (4). Значение статистического параметра *p*, определяющего отличие этого коэффициента от нуля, составило примерно 0,99. Это означает, что с вероятностью, равной 99 %, значение коэффициента *B* можно принять равным нулю.

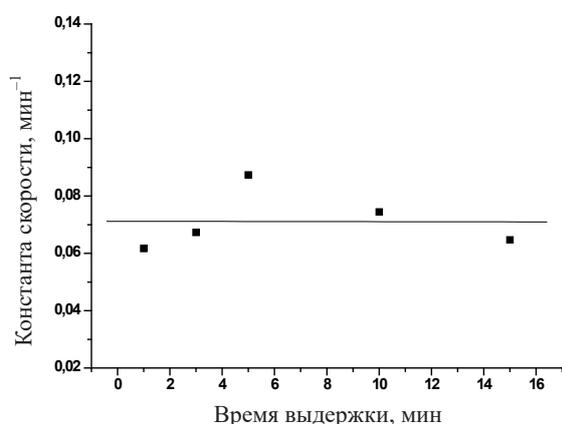


Рис. 4. Зависимость константы скорости гомогенного разложения пиролизической смолы при температуре 300 °C (первый метод исследования)

Fig. 4. Dependence of the rate constant of homogeneous decomposition of pyrolysis tar at a temperature of 300 °C (the first method of research)

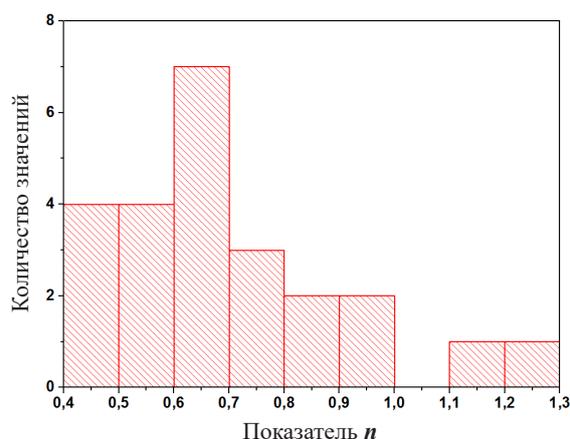


Рис. 5. Частотные характеристики показателя *n* уравнения Аврами–Ерофеева

Fig. 5. Frequency characteristics of the exponent *n* of the Avrami–Erofeev equation

Анализ табл. 6 показал, что все изученные варианты экспериментальных данных характеризуются своим индивидуальным значением показателя n . Частотное распределение этого параметра представлено на рис. 5.

Видно, что наиболее часто встречающееся значение показателя n заключено в пределах от 0,6 до 0,7. Среднее значение этого показателя, рассчитанное по данным табл. 6, составило 0,694 (95 % ДИ от 0,605 до 0,783), а медианное значение – 0,639.

Данные табл. 6 и представленные на рис. 5 показывают, что в случае термического разложения пиролитической смолы каждый исследованный образец имеет свой индивидуальный показатель n . Это означает, что в случае разложения пиролитической смолы не существует такого универсального показателя n , который позволил бы получить корректные значения константы скорости данного процесса для других образцов и других температур.

Описанная процедура расчета показателя n позволяет также определить усредненное по всем экспериментальным точкам значение константы скорости (\bar{k}). Оно дается первым членом в правой части линейной аппроксимации. Например, в случае гомогенного разложения пиролитической смолы при температуре 300 °С (первый метод исследования) усредненное значение константы скорости, как следует из результатов линейной аппроксимации, составило 0,07118 мин⁻¹.

Эту величину можно также рассчитать по формуле

$$\bar{k} = \frac{\sum_{i=1}^m k_i}{m}, \quad (6)$$

где k_i – значение константы скорости в момент времени t_i , вычисленное по выражению (3), а m – количество экспериментальных точек.

В табл. 7 приведены усредненные значения константы скорости термического разложения пиролитической смолы, рассчитанные с использованием формулы (6) и данных табл. 2–6.

Т а б л и ц а 7. Усредненные значения константы скорости термического разложения смолы
T a b l e 7. Average tar thermal decomposition rate constants

Параметр	Первый метод			Второй метод		
Гомогенный процесс						
$t, ^\circ\text{C}$	300	350	400	300	350	400
$k, \text{мин}^{-1}$	0,071	0,127	0,165	0,063	0,107	0,160
Разложение в присутствии K_2SO_4						
$t, ^\circ\text{C}$	300	350	400	300	350	400
$k, \text{мин}^{-1}$	0,072	0,267	0,493	0,100	0,357	0,434
Разложение в присутствии MgSO_4						
$t, ^\circ\text{C}$	300	350	400	300	350	400
$k, \text{мин}^{-1}$	0,068	0,228	0,385	0,065	0,235	0,396
Разложение в присутствии МОКС						
$t, ^\circ\text{C}$	300	350	400	300	350	400
$k, \text{мин}^{-1}$	0,145	0,217	0,297	0,144	0,227	0,299

На рис. 6. для сравнения представлены экспериментальные (второй метод исследования) и расчетные значения степени гомогенного разложения пиролитической смолы при температуре 350 °С.

Расчетные значения степени разложения пиролитической смолы, показанные на этом рисунке, были вычислены по выражению

$$\alpha_t = 1 - \exp\left(-(k \cdot t)^{1/n}\right), \quad (7)$$

полученному путем преобразования уравнения (2). При вычислении степени разложения были использованы показатель n , равный 0,440 (см. табл. 6), и усредненное значение константы скорости, равное 0,107 мин⁻¹ (см. табл. 7).

Как можно видеть из данных, приведенных на рис. 6, методы определения показателя n и расчета значения константы скорости, описанные выше, позволяют получить хорошее согласие между расчетными и экспериментальными значениями степени разложения пиролитической смолы. Аналогичное согласие в расчетных и экспериментальных значениях степени разложения пиролитической смолы было установлено и для других вариантов экспериментальных данных, установленных в настоящей работе. Это позволяет сделать вывод о том, что уравнение Авраами–Ерофеева корректно описывает кинетику термического разложения древесной пиролитической смолы. Полученный результат говорит о том, что, выбрав соответствующим образом параметры уравнения Авраами–Ерофеева, можно адекватно описать изменение степени конверсии от времени. Однако это соответствие получено на том же массиве данных, на котором определялись параметры уравнения. Иначе говоря, возможность достаточно точного предсказания значений этих констант отсутствует.

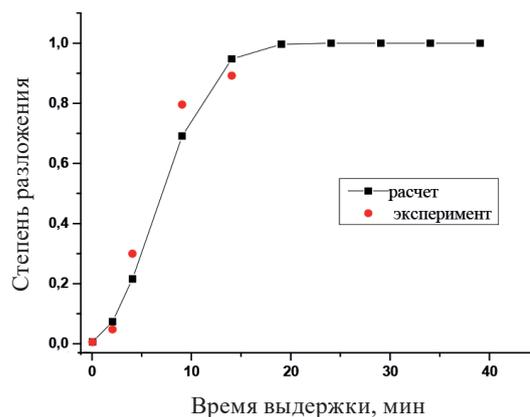


Рис. 6. Сравнение экспериментальных (второй метод исследования) и расчетных степеней гомогенного разложения пиролитической смолы при температуре 350 °С

Fig. 6. Comparison of experimental (second research method) and calculated degrees of homogeneous decomposition of pyrolysis tar at a temperature of 350 °C

Как известно [15, 16], указанное уравнение описывает кинетику термического разложения вещества, лимитирующей стадией которого является зародышеобразование. И это позволяет сделать вывод, что лимитирующей стадией разложения древесной пиролитической смолы в условиях, изученных в настоящей работе, является зародышеобразование.

На рис. 7, а представлена Аррениусовская зависимость константы скорости гомогенного разложения пиролитической смолы, определенная на основании данных, установленных при использовании первого метода исследования.

Аппроксимация данных, представленных на рис. 7, b, приводит к следующим результатам:

$$Y = -\frac{3,26913}{T} + 3,09821, \quad R_{adj}^2 = 0,944, \quad p = 0,10703. \quad (8)$$

Здесь R_{adj}^2 – скорректированный коэффициент детерминации Пирсона; p – статистический параметр, определяющий вероятность того, что угол наклона получен случайно и, следовательно, не определяет реальную зависимость константы скорости.

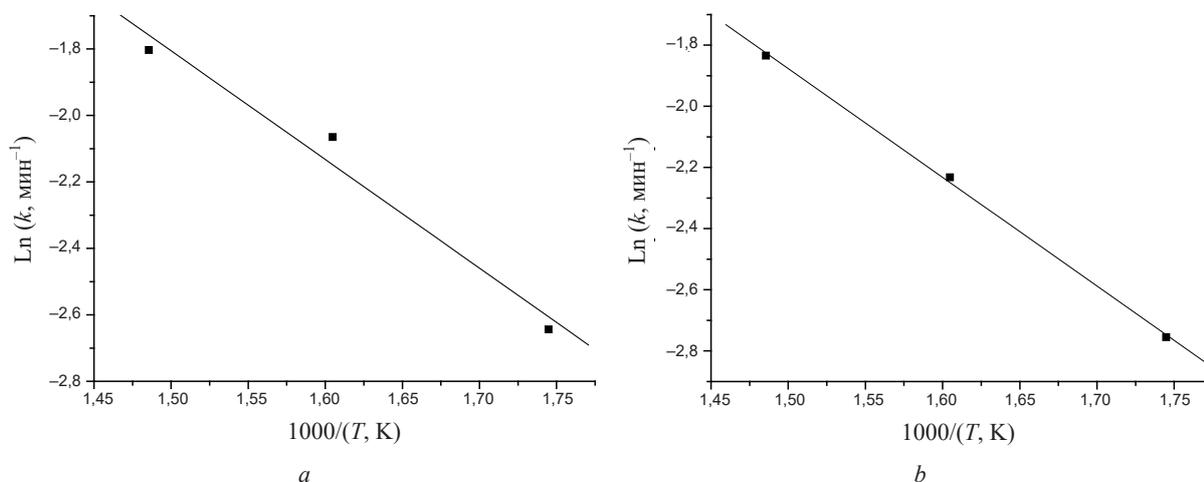


Рис. 7. Аррениусовская зависимость реакции гомогенного разложения пиролитической смолы: а – первый метод исследования, б – второй метод исследования

Fig. 7. Arrhenius dependence of the reaction of homogeneous decomposition of pyrolysis tar: а – the first method of investigation, б – the second method of investigation

Умножение статистического параметра p на 100 % позволяет определить вероятность случайного значения угла наклона Аррениусовской зависимости. В обсуждаемом случае эта вероятность составляет 10,7 %, что говорит о недостаточной точности полученных экспериментальных данных константы скорости.

Использование коэффициентов аппроксимации (8) дает значение энергии активации E , которое составляет 27,2 кДж/моль, и значение предэкспоненциального фактора A , равное $2,22 \cdot 10^1$ мин⁻¹.

В соответствии с этими величинами Аррениусовское выражение для константы скорости гомогенного разложения пиролизической смолы (первый метод исследования) запишется в виде

$$k = 2,22 \cdot 10^1 \cdot \exp\left(-\frac{27200}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (9)$$

Аррениусовская зависимость константы скорости гомогенного разложения пиролизической смолы, определенная на основании экспериментальных результатов, установленных при использовании второго метода исследований, приведена на рис. 7, *b*.

Аппроксимация данных, представленных на рис. 7, *b*, приводит к следующим результатам:

$$Y = -\frac{3,55679}{T} + 3,45876, \quad R_{adj}^2 = 0,99797, \quad p = 0,0203. \quad (10)$$

Использование коэффициентов аппроксимации (10) дает значения энергии активации $E = 29,6$ кДж/моль и предэкспоненциального фактора $A = 3,18 \cdot 10^1$ мин⁻¹.

Аррениусовское выражение для константы скорости гомогенного разложения пиролизической смолы (второй метод исследования) с учетом этих величин запишется в виде

$$k = 3,18 \cdot 10^1 \cdot \exp\left(-\frac{29600}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (11)$$

Выражение (11) дает более точные значения константы скорости гомогенного разложения пиролизической смолы, нежели выражение (9). На это указывает сравнение результатов аппроксимации значений константы скорости, установленных с помощью обоих методов исследований. Так, согласно выражению (10), значение скорректированного коэффициента детерминации в случае данных, установленных с использованием второго метода исследования, составило 0,99797, в то время как аналогичная величина в случае данных, полученных при помощи первого метода, составила только 0,944. В пользу вывода о том, что уравнение (11) дает более точные значения константы скорости, говорит сравнение значений статистического параметра p , а также данные, приведенные на рис. 7. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что энергия активации гомогенного разложения пиролизической смолы составляет примерно 29,6 кДж/моль.

Ограниченное количество экспериментальных данных, установленных в опытах по исследованию кинетики разложения пиролизической смолы в присутствии K_2SO_4 , $MgSO_4$ и МОКС, не позволяет корректно выделить вклад этих веществ в разложение пиролизической смолы. Данное ограничение стало причиной того, что в настоящей работе была выполнена только косвенная оценка влияния указанных соединений на скорость разложения пиролизической смолы. Эта оценка опиралась на рассмотрение некоторой фиктивной константы скорости, отражающей совместную убыль пиролизической смолы в гомогенном процессе и в процессе, обусловленном влиянием вещества, введенного в реакционную зону с целью исследования его каталитических свойств. Такой подход позволил определить лишь некоторую суммарную константу скорости.

На рис. 8, *a* представлена Аррениусовская зависимость такой константы скорости разложения пиролизической смолы в присутствии МОКС, установленная на основании определенных при использовании первого метода исследования данных.

Результаты аппроксимации данных, приведенных на рис. 8, *a*, следующие:

$$Y = -\frac{2,76499}{T} + 2,90001, \quad R_{adj}^2 = 0,99879, \quad p = 0,01563. \quad (12)$$

Использование коэффициентов аппроксимации (12) приводит к значениям энергии активации $E = 23,0$ кДж/моль и предэкспоненциального фактора $A = 1,82 \cdot 10^1$ мин⁻¹.

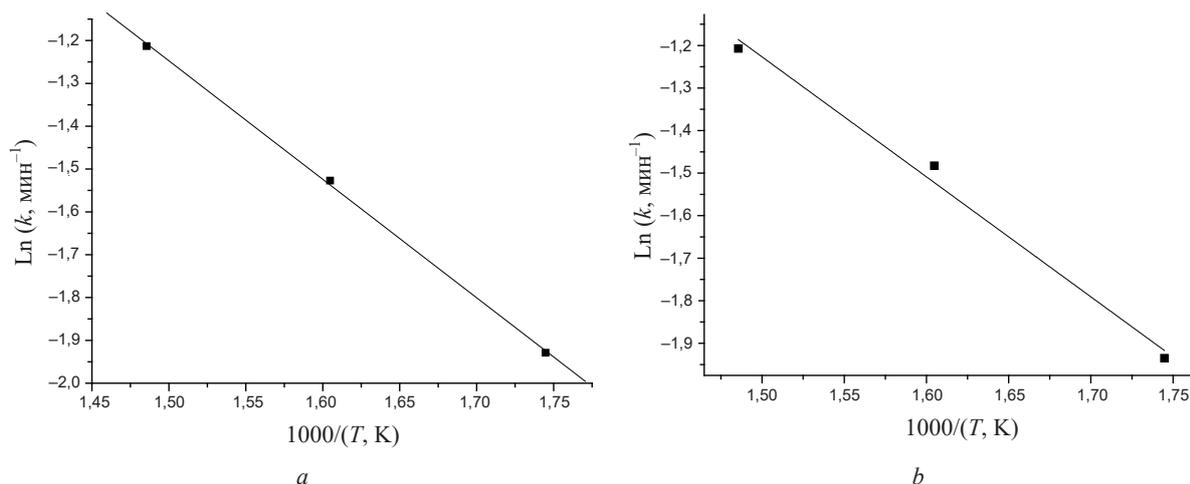


Рис. 8. Аррениусовская зависимость константы скорости разложения пиролизической смолы в присутствии МОКС: *a* – первый метод исследования, *b* – второй метод исследования

Fig. 8. Arrhenius dependence of the rate constant of decomposition of pyrolysis tar in the presence of tailings of potassium salts production: *a* – the first method of investigation, *b* – the second method of investigation

В соответствии с этими величинами Аррениусовское выражение для константы скорости гомогенного разложения пиролизической смолы (первый метод исследования) запишется в виде

$$k = 1,82 \cdot 10^1 \cdot \exp\left(-\frac{23000}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (13)$$

Аррениусовская зависимость формальной константы скорости разложения пиролизической смолы в присутствии МОКС, установленная на основании определенных при использовании второго метода исследования данных, представлена на рис. 8, *b*.

Результаты аппроксимации данных, приведенных на рис. 8, *b*, представим следующим образом:

$$Y = -\frac{2,82038}{T} + 3,0038, \quad R_{adj}^2 = 0,98272, \quad p = 0,05927. \quad (14)$$

Использование коэффициентов аппроксимации (14) дает значения энергии активации $E = 23,4$ кДж/моль и предэкспоненциального фактора $A = 2,02 \cdot 10^1$ мин⁻¹.

Аррениусовское выражение для константы скорости гомогенного разложения пиролизической смолы (второй метод исследования) запишется при этом в виде

$$k = 2,02 \cdot 10^1 \cdot \exp\left(-\frac{23400}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (15)$$

Сравнение выражений (13) и (15) показывает, что первый и второй методы исследования в случае введения в реакционную зону частиц МОКС приводят практически к одинаковому значению энергии активации, равному примерно 23 кДж/Моль.

Аналогичный анализ был также выполнен на основании экспериментальных результатов, установленных в опытах в присутствии сульфата калия (K₂SO₄) и сульфата магния (MgSO₄). Аррениусовские параметры термического разложения пиролизической смолы в присутствии указанных веществ приведены в табл. 8. Здесь же для сравнения приведены Аррениусовские параметры, установленные для гомогенного разложения пиролизической смолы и разложения в присутствии МОКС.

Анализ данных табл. 8 показывает, что наиболее точные результаты были установлены в ходе гомогенного процесса при использовании второго метода исследования, а также при изучении каталитических свойств частиц МОКС. Корректные данные для частиц были определены при использовании как первого, так и второго метода исследования. Точность данных, уста-

новленных в случае введения в реакционную зону MgSO_4 и K_2SO_4 , существенно ниже, нежели в случае гомогенного разложения пиролитической смолы и разложения в присутствии частиц МОКС. На это указывает сравнение значений скорректированного коэффициента детерминации, а также значений статистического параметра p , приведенных в табл. 8.

Т а б л и ц а 8. Аррениусовские параметры разложения пиролитической смолы

T a b l e 8. Arrhenius decomposition parameters of pyrolysis tar

Тип исследования	Параметры			
	E , кДж/моль	A , мин ⁻¹	R^2_{adj}	p
Первый метод исследования				
Гомогенный процесс	27,2	$2,22 \cdot 10^1$	0,9440	0,10 703
В присутствии МОКС	23,0	$1,82 \cdot 10^1$	0,99 879	0,01 563
В присутствии K_2SO_4	62,4	$3,78 \cdot 10^4$	0,94 818	0,10 292
В присутствии MgSO_4	56,1	$9,57 \cdot 10^3$	0,93 645	0,11 409
Второй метод исследования				
Гомогенный процесс	29,6	$3,18 \cdot 10^1$	0,99 797	0,0203
В присутствии МОКС	23,4	$2,02 \cdot 10^1$	0,98 272	0,05 927
В присутствии K_2SO_4	47,9	$2,69 \cdot 10^3$	0,75 702	0,22 665
В присутствии MgSO_4	58,5	$1,53 \cdot 10^4$	0,92 756	0,1219

Данное обстоятельство не позволяет сделать обоснованный вывод относительно корректности определения Аррениусовских параметров разложения пиролитической смолы в присутствии MgSO_4 и K_2SO_4 . Как следует из табл. 8, энергия активации термического разложения пиролитической смолы в присутствии сульфатов магния и калия превышает примерно в 2 раза энергию активации чисто гомогенного процесса. При этом скорость разложения пиролитической смолы в присутствии этих веществ при температуре 350 °С и выше практически в 2 раза превышает скорость гомогенного процесса.

Как известно, возрастание скорости химического процесса при введении в реакционную зону какого-либо вещества и снижение энергии активации процесса свидетельствуют о каталитической активности такого вещества. Именно таким свойством обладает МОКС. Как видно из табл. 8, суммарная энергия активации разложения пиролитической смолы при введении в реакционную зону частиц МОКС снижается примерно на 6 кДж/моль по сравнению с гомогенным процессом. Исходя из этого можно заключить, что МОКС является катализатором термического разложения пиролитической смолы. Как было установлено в ходе эксперимента, введение MgSO_4 или K_2SO_4 в реакционную зону приводит к ускорению термического разложения пиролитической смолы, однако при этом происходит повышение энергии активации. Одним из возможных объяснений этого несоответствия, по-видимому, следует считать недостаточную точность экспериментальных результатов, установленных при изучении каталитических свойств сульфатов магния и калия, на что указывают высокие значения статистического параметра p для этих соединений. И это не позволяет в настоящее время сделать вывод относительно роли указанных веществ в процессе термического разложения пиролитической смолы. Однако можно предположить, что ускорение процесса разложения смолы в присутствии MgSO_4 и K_2SO_4 , как и в случае МОКС, обусловлено каталитическим воздействием.

Заключение. В ходе экспериментального исследования термического разложения пиролитической смолы, выполненного в изотермических условиях при температурах 300, 350 и 400 °С, установлено, что кинетику этого процесса можно описать с помощью уравнения Авраами–Ерофеева с переменным показателем n . Анализ полученных данных показал, что область изменения этого показателя включает величины от 0,415 до 1,238. Среднее значение показателя n , рассчитанное по всем вариантам исследования, составило 0,694 (95 % ДИ от 0,605 до 0,783), а медианное значение – 0,639. Как известно, уравнение Авраами–Ерофеева описывает кинетику термического разложения вещества в конденсируемом состоянии, определяемую процессом зародышеобразования. Это позволяет предположить, что в случае термического разложения пиролитической смолы в интервале температур 300–400 °С зародышеобразование является лимитирующей стадией суммарного процесса.

Обнаружено, что скорость разложения пиролизической смолы возрастает в случае внесения в реакционную зону частиц МОКС, сульфата калия и сульфата магния. В случае частиц МОКС можно с большой уверенностью утверждать, что это результат каталитического влияния МОКС. В случае сульфата калия и сульфата магния можно предполагать, что ускорение термического разложения пиролизической смолы в присутствии этих веществ также обусловлено каталитическим эффектом.

Список использованных источников

1. Fortov, V. E. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia / V. E. Fortov, O. S. Popel' // *Therm. Eng.* – 2014. – Vol. 61, № 6. – P. 389–398. <https://doi.org/10.1134/S0040601514060020>
2. Coal and Biomass Gasification: Recent Advances and Future Challenges / S. De [et al.]. – Springer Nature, 2018. – 521 p. <https://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-7335-9>
3. Afanas'eva, O. V. Energy Efficiency of Small Coal-Fired Power Plants as a Criterion of Their Wide Applicability / O. V. Afanas'eva, G. R. Mingaleeva // *Solid Fuel Chem.* – 2009. – Vol. 43, № 1. – P. 55–59. <http://dx.doi.org/10.3103/S0361521909010121>
4. Доброго, К. В. Макрокинетические модели термического разложения доломита для расчета сорбционных систем газогенераторов / К. В. Доброго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ.* – 2015. – № 5. – С. 51–59.
5. Guoging Guan. Heterogeneous Catalysts from Natural Sources for Tar Removal: A Mini Review / Guoging Guan, Xiaogang Hao, Abuliti Abudula // *J. Adv. Catal. Sci. Techn.* – 2014. – Vol. 1, № 1. – P. 20–28. <http://dx.doi.org/10.15379/2408-9834.2014.01.01.4>
6. Sutton, D. Review of literature on catalysts for biomass gasification / D. Sutton, B. Kelleher, J. R. H. Ross // *Fuel Process. Technol.* – 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)
7. Characterization and treatment of tars and biomass gasifiers / E. G. Baker [et al.] // *AICHE 1988: Summer National Meeting, Denver, Colorado. August 21–24, 1988.* – Denver, 1988. – P. 1–11.
8. 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
9. 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. <https://doi.org/10.1021/ie0498403>
10. Катализ и энергетика. Опыт Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН / В. Н. Пармон // *Энергет. вестн.* – 2017. – № 22. – С. 56–73.
11. Commercial Steam Reforming Catalysts To Improve Biomass Gasification with Steam–Oxygen Mixtures. 2. Catalytic Tar Removal / M. P. Azner [et al.] // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 1998. – Vol. 37, № 7. – P. 2668–2680. <https://doi.org/10.1021/ie9706727>
12. 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.
13. Catalytic Cracking of Tars Derived from Rice Hull Gasification over Goethite and Palygorskite / Haibo Liu [et al.] // *Appl. Clay Sci.* – 2012. – Vol. 70. – P. 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.006>
14. Исследование кинетики термического разложения пиролизной смолы / М. В. Малько [и др.] // *Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2016. – № 4. – С. 84–90.
15. Vyazovkin, S. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data / S. Vyazovkin, C. A. Wight // *Thermochim. Acta.* – 1999. – Vol. 340–341. – P. 53–68. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00253-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00253-1)
16. Yunging. Han. Theoretical Study of Thermal Analysis Kinetics: Thesis and Dissertation – Mechanical Engineering [Electronic resource]. – Lexington, Kentucky, 2014. – Mode of access: https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1036&content=me_etds – Date of access: 15.05.2019.

References

1. Fortov V. E., Popel' O. S. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 389–398. <https://doi.org/10.1134/S0040601514060020>
2. De S., Agarwal A. K., Moholkar V. S., Bhaskar T. *Coal and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges.* Springer Nature Publ., 2018. 521 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7335-9>
3. Afanas'eva O. V., Mingaleeva G. R. Energy Efficiency of Small Coal-Fired Power Plants as a Criterion of Their Wide Applicability. *Solid Fuel Chemistry*, 2009, vol. 43, no. 1, pp. 55–59. <http://doi.org/10.3103/S0361521909010121>
4. Dobrego K. V. Dolomite thermal-decomposition macrokinetic models for evaluation of the gasgenerators sorbent systems. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2015, no. 5, pp. 51–59 (in Russian).

5. Guoging Guan, Xiaogang Hao, Abuliti Abudula. Heterogeneous Catalysts from Natural Sources for Tar Removal: A Mini Review. *Journal of Advanced Catalysis Science and Technology*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 20–28. <http://doi.org/10.15379/2408-9834.2014.01.01.4>
6. 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)
7. 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.
8. 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).
9. 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>
10. Parmon V. N. Catalysis and energy. Experience of the Boreskov Institute of Catalysis SB RAS. *Energeticheskii vestnik = Energy Bulletin*, 2017, no. 22, pp. 56–73 (in Russian).
11. Azner, M. P., Caballero M. F., Gil J., Martin J. A. Commercial Steam Reforming Catalysts To Improve Biomass Gasification with Steam–Oxygen Mixtures. 2. Catalytic Tar Removal. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1998, vol. 37, no. 7, pp. 2668–2680. <https://doi.org/10.1021/ie9706727>
12. 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).
13. Haibo Liu, Tianhu Chen, Donguin Change, Chen Dong, He Hongping, Frost R. Catalytic Cracking of Tars Derived from Rice Hull Gasification over Goethite and Palygorskite. *Applied Clay Science*, 2012, vol. 70, pp. 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.006>
14. Mal’ko M. V., Asadchii A. N., Vasilevich S. V., Degterov D. V. Investigation of the kinetics of thermal decomposition of pyrolysis resin *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 4, pp. 84–90 (in Russian).
15. Vyazovkin S., Wight C. A. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data. *Thermochimica Acta*, 1999, vol. 340–341, pp. 53–68. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00253-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00253-1)
16. Han Y. *Theoretical Study of Thermal Analysis Kinetics: Thesis and Dissertation – Mechanical Engineering*. Lexington, Kentucky, 2014. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/232563059.pdf> (accessed 15 May 2019).

Информация об авторах

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

Добрего Кирилл Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-1754-8262>. E-mail: kirilldobrego@gmail.com

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

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

Information about the authors

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

Kirill V. Dobrego – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-1754-8262>. E-mail: kirilldobrego@gmail.com

Siarhei V. Vasilevich – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory, Belarusian State Aviation Academy (77, Ubo-revich Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svasilevich@yandex.ru

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