

10. Медведев, Г. М. Технология макаронного производства: учебник для вузов / Г. М. Медведев. – М. : Колос, 1998. – 272 с.
11. Груданов, В. Я. Процесс формирования макаронных изделий в узлах прессования с улучшенными гидравлическими и технологическими характеристиками / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, В. М. Поздняков // Весці. НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2013. – № 2. – С. 58–65.
12. Назаров, Н. И. Технология макаронного производства / Н. И. Назаров. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1969. – 288 с.

## References

1. Shenkel, G. (1962), *Shnekovye pressy dlya plastmass* [Screw presses for plastics lane. with it], in Shapiro, A. Ya. (ed.), Goskhimizdat, Leningrad, RU.
2. Elbirii, B. and Lindt, J. T. (1983), "Mathematical modeling of melting of polymers in barrier-screw extruders", *Polymer Engineering and Science*, vol. 23, no. 2, pp. 86–94.
3. Martin, J. (1986), "Extruderzonen in denen Warmedurch Leitung und erzwungene Konvektion abgefuehrt wird", *Warmeuebertrag*, Kunststoffanf bereit, Dusseldorf, DE, no. 2, pp. 169–196.
4. Potente, H. and Lappe, H. (1984), "Potente Durchsatzgleichung fur Konventionele, Plastifizier- extruder", *Kunststoffe*, bd. 34, no. 3, pp. 173–177.
5. Melcion, I.P. and Colonna, P. (1983), "La cnisson-extrusion dans le domaine alimetaire: principe, applications, perspectives", *Revue de l'alimentation animal*, no. 368, pp. 45–51, 53–54.
6. Rossen, I. L. and Miller, R.C. (1973), "Food extrusion", *Food technology*, no. 27, pp. 46–53.
7. Gorbatov, A. V., Machikhin, S. A., Maslov, A. M., Tabachnikov, V. P., Machikhin, Yu. A. and Kosoi, V. D. (1982), *Strukturno-mekhanicheskie kharakteristiki pishchevykh produktov* [Structural and mechanical characteristics of the food], in Gorbatov A. V. (ed.), Light and Food Industry, Moscow, RU.
8. Machihin, Y. (1981), *Inzhenernaya reologiya pishchevykh materialov* [Engineering rheology of food materials], Light and food industrial st, Moscow, RU.
9. Nazarov, N. I., Kalinin, M. A. and Kalinin, Y. (1971), "Structurally-mechanical properties of the pasta", *Bakery and confectionery industry*, vol. 2, pp. 18–20.
10. Medvedev, G. M. (1998), *Tekhnologiya makaronnogo proizvodstva* [The technology of production of pasta]: a textbook for high schools, Kolos, Moscow, RU.
11. Grudanov, V. Y., Torhan, A. B. and Pozdnyakov, V. M. (2013), "The process of forming pasta pressing units with improved processability and hydraulic", *Vesti NAN Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-technical series], vol. 2, pp. 58–65.
12. Nazarov, N. I. (1969), *Tekhnologiya makaronnogo proizvodstva* [Technology macaroni production], Light and Food Industry, Moscow, RU.

## Информация об авторах

*Груданов Владимир Яковлевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции. Белорусский государственный аграрный технический университет (220124, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Беларусь).

*Торган Анна Борисовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции. Белорусский государственный аграрный технический университет (220124, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Беларусь). E-mail: anechkat@tut.by

*Ткачева Людмила Тимофеевна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны труда. Белорусский государственный аграрный технический университет (220124, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Беларусь).

## Для цитирования

Груданов, В. Я. Моделирование и оптимизация процессов формирования макаронных изделий в каналах матриц ступенчато-переменного сечения / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, Л. Т. Ткачева // Вес. Нац. акад. Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2016. № 4. С. 73–83.

## Information about the authors

*Grudanov Vladimir Yakovlevich* – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of Technology and Logistics Processes, Processing of Agricultural Products. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220124, Minsk, Belarus).

*Torhan Anna Borisovna* – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor of Technology and Logistics Processes, Processing of Agricultural Products. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220124, Minsk, Belarus). E-mail: anechkat@tut.by

*Tkacheva Lyudmila Timofeevna* – Ph. D., (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor of Department of Health and Safety. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220124, Minsk, Belarus).

## For citation

Grudanov V. Ya., Torhan A. B., Tkachyova L. T. Modeling and optimization of processes of shaping of pastas in channels of matrices of step-variable section. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 73–83.

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

УДК 549.742.121+662.765

Поступила в редакцию 20.05.2016

Received 20.05.2016

**М. В. Малько, А. Н. Асадчий, С. В. Василевич, Д. В. Дегтеров**

*Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ  
ПИРОЛИЗНОЙ СМОЛЫ**

Обсуждаются результаты экспериментального исследования термического разложения смолы, образовавшейся в процессе пиролиза древесных опилок. Опыты по разложению смолы выполнены в изотермических условиях на лабораторной установке при 500, 600, 700 и 850 °С. Определены скорость гомогенного процесса термического разложения смолы и предельные степени разложения. Энергия активации гомогенного процесса по данным настоящей работы составила 63,1 кДж/моль. Установлено, что скорость термического разложения смолы повышается в случае внесения в реакционную зону образцов природных доломитов Беларуси. Это обусловлено протеканием гетерогенной каталитической реакции разложения смолы. Кажущаяся энергия активации данного процесса составила 57,2 кДж/моль, что согласуется с оценками других исследователей. Сделан вывод о перспективности природных доломитов Беларуси в качестве катализаторов термического разложения тяжелых углеводородов, образующихся в процессах термохимической конверсии биомассы.

*Ключевые слова:* пиролизная смола, доломит, кинетика разложения, энергия активации, предэкспоненциальный фактор.

**M. V. Malko, A. N. Asadchy, S. V. Vasilevich, D. V. Degterov**

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

**STUDY OF THE KINETICS OF PYROLYTIC TAR THERMAL DECOMPOSITION**

The results of an experimental study of the thermal decomposition of tar formed in sawdust pyrolysis are discussed. The study was performed under static isothermal conditions at temperatures 500, 600, 700 and 850°C using a laboratory reactor.

The reactor is equipped with an electrical heater, which allows heating of the studied tar samples up to 1273 °C. The reactor consists of a reaction chamber made as a stainless steel cylinder with a diameter of 2 cm and a height of 10 cm.

The temperature in the reaction chamber was recorded using a thermocouple and a temperature meter-controller «Pine-002», providing the measurement of temperatures up to 1273 °C with the accuracy of  $\pm 0,01$  °C.

Samples of the tar produced at the pyrolysis of sawdust at 450 °C were installed into a quartz vessel and kept in the reaction chamber until they reached constant weight. This required about 60 minutes at 500 °C and about 5 minutes at 850°C and is a result of a homogeneous decomposition of tar. The initial weight of tar samples was about 1.5 gram. The change in their weights was determined at regular time intervals using the Stoll electronic balance with a relative error of 2%.

On the basis of the performed studies it was found that the apparent activation energy of a homogeneous decomposition of tar is equal to approximately 63.1 kJ/mol.

It was found as well that the rate of tar decomposition increased when samples of natural Belarusian dolomites were placed into the reaction zone. This increase is due to the occurrence of a heterogeneous catalytic reaction of tar decomposition. The apparent activation energy of this process was determined to be equal to 57.2 kJ/mol which is consistent with estimations of other researchers.

The conclusion about the prospects of natural dolomite Belarus as catalysts of thermal decomposition of heavy hydrocarbons generated during the thermochemical conversion of biomass has been drawn on the basis of the established results.

*Keywords:* pyrolytic tar, dolomite, decomposition kinetics, activation energy, pre-exponential factor

**Введение.** Газификация биомассы рассматривается специалистами многих стран мира в качестве перспективной технологии, позволяющей производить топливо для газовых турбин и когенерационных установок [1]. Фундаментальной проблемой практического применения газифи-

кации биомассы является образование пиролизных смол (тяжелых углеводов), которые имеют высокую точку росы и способны откладываться на различных элементах установок, что приводит к забиванию регулирующей арматуры, фильтров и т. п. [2–4]. Установлено, что полное разложение компонентов, входящих в состав смолы, возможно только при температуре горения порядка 1300 °С. Для обеспечения таких условий требуются значительные затраты энергии, существенно снизить которые позволяет применение катализаторов разложения углеводов [1].

В настоящее время в разных странах мира изучаются различные типы катализаторов термического разложения смолы, образующейся в процессах термохимической конверсии биомассы, на основе таких металлов, как Fe, Ni, Ru, Rh, Pt, а также неметаллические катализаторы (природные доломиты  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , оливин  $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$  и др.). В результате данных исследований установлена высокая активность катализаторов на основе Ni, Ru, Rh, Pt, а также природных доломитов [5, 6].

В случае никелевых катализаторов нерешенной проблемой является отложение на их поверхности коксоподобного вещества, приводящее к резкому снижению каталитической активности. Катализаторы на основе Ru, Rh, Pt менее подвержены этому воздействию, однако их высокая стоимость исключает использование на промышленных установках.

Доломиты также имеют существенный недостаток – низкие механические свойства, что приводит к сильной эрозии и к снижению каталитической активности.

Преодоление отмеченных недостатков катализаторов разложения смолы является основным направлением в разработке эффективного и экономически оправданного способа очистки газовой смеси, образующейся при термохимической конверсии биомассы.

Проблема очистки пиролизных газов от компонентов смолы актуальна и для Беларуси. Наша страна имеет большие запасы древесины [7] и природных доломитов [8], что дает возможность получения газового топлива для покрытия энергетических потребностей.

В настоящей работе обсуждаются предварительные результаты исследования термического разложения смолы, образовавшейся в процессе пиролиза древесных опилок. Опыты выполнены в условиях гомогенного протекания этого процесса при 500, 600, 700 и 850 °С, а также в присутствии образцов природного доломита.

**Методика экспериментального исследования.** Опыты по разложению смолы выполнены на лабораторной установке (рис. 1) с реактором 1, оснащенным электрическим нагревателем 2, позволяющим нагревать образцы отожженного доломита до 1000 °С. Камера реактора 3 выполнена в виде цилиндра из нержавеющей стали диаметром 2 см и высотой 10 см, в который помещалась емкость 4 из кварцевого стекла с пиролизными смолами и доломитом. Температура в реакционной камере регистрировалась с помощью термодатчика 5 и измерителя-регулятора температур «Сосна-002» 6, обеспечивающих возможность работы при измерении температур до 1100 °С с точностью до  $\pm 0,01$  °С.

В опытах образцы смол 7 и доломита 8 выдерживались при заданной постоянной температуре. Масса образцов измерялась через определенные промежутки времени на электронных весах Stohl с относительной погрешностью 2%.

Образец смолы, полученной путем пиролиза древесины при 450 °С, помещался в кварцевую емкость, расположенную в реакторе. Содержание влаги в смолах 83,75%, плотность 1029,5 кг/м<sup>3</sup>. В случае каталитического разложения смол в кварцевую емкость дополнительно помещался образец отожженного доломита массой около 1,5 г.

**Результаты исследования.** Степень протекания реакции определялась по снижению массы образца, выдерживаемого при постоянной температуре. Результаты исследования динамики изменения массы смол представлены в табл. 1, 2. Значения степеней разложения смол рассчитаны по формуле

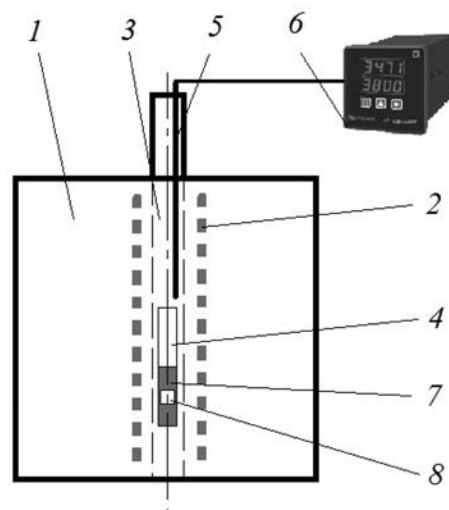


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 – реактор; 2 – электрический нагреватель; 3 – камера реактора; 4 – кварцевая емкость; 5 – термодатчик; 6 – измеритель-регулятор температур «Сосна-002»; 7, 8 – образцы смолы и доломита соответственно

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

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

Т а б л и ц а 1. Степени гомогенного разложения пиролизной смолы

$t$ , мин	500 °C	600 °C	700 °C	850 °C
0	0	0	0	0
1	–	–	0,207	0,546
2	–	0,344	0,419	0,763
5	0,126	0,508	0,652	0,842
10	0,231	0,672	0,690	0,842
20	0,336	0,713	0,690	0,842
30	0,371	0,754	0,729	0,842
60	0,388	0,754	0,729	0,842
90	0,388	0,754	0,729	0,842

Т а б л и ц а 2. Степени разложения пиролизной смолы в присутствии доломита

$t$ , мин	500 °C	600 °C	700 °C	850 °C
0	0	0	0	0
1	–	–	0,419	0,657
2	–	0,380	0,692	0,844
5	0,316	0,654	0,761	0,844
10	0,377	0,731	0,761	0,844
20	0,377	0,731	0,761	0,844
30	0,377	0,731	0,761	0,844
60	0,377	0,731	0,795	0,844
90	0,377	0,750	0,795	0,844

На рис. 2 представлены степени разложения смол, установленные в гомогенном процессе и в присутствии доломита. Как следует из данных табл. 1, 2 и рис. 2, скорость термического разложения смолы в случае присутствия доломита в зоне разложения оказалась выше, чем скорость

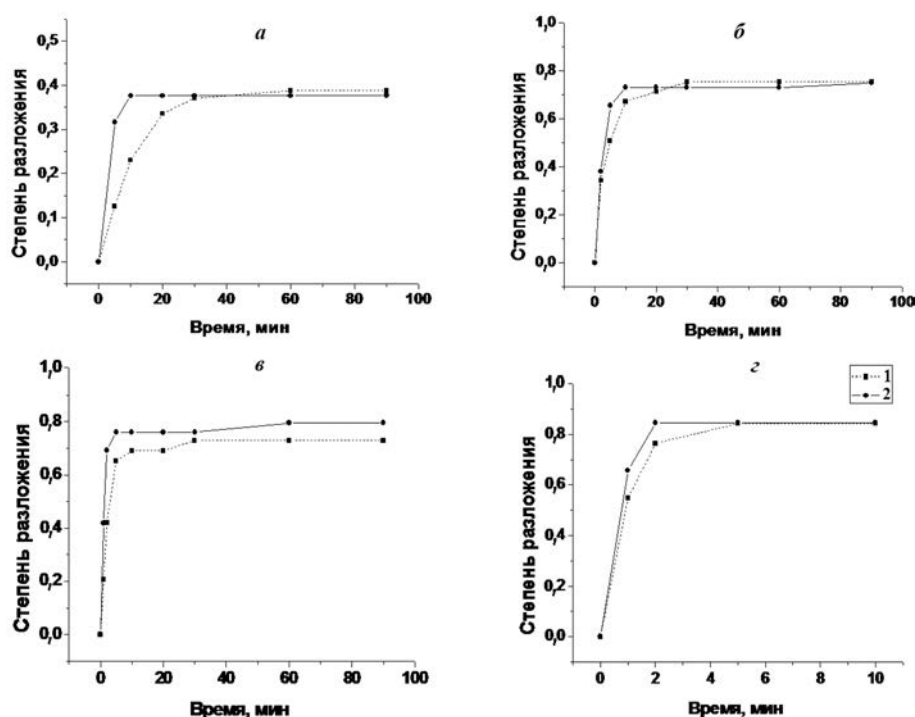


Рис. 2. Степени разложения смолы при температурах 500 °C (а), 600 °C (б), 700 °C (в), 850 °C (з): 1 – гомогенное разложение; 2 – разложение в присутствии доломита

гомогенного процесса. Это не может быть обусловлено протеканием каких-либо других процессов (например, сорбирования смол доломитом). Такое заключение следует из равенства предельных степеней разложения смол, установленное в настоящей работе для гомогенного процесса и процесса, протекающего в присутствии доломита (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. **Предельные степени разложения смолы в гомогенном процессе и в случае присутствия доломита**

Условия эксперимента	T, °C			
	500	600	700	850
Гомогенное разложение	0,388	0,754	0,729	0,842
Присутствие доломита	0,377	0,750	0,795	0,844

Если бы наблюдаемое ускорение убыли смолы в присутствии доломита было бы обусловлено адсорбцией и абсорбцией компонентов смолы доломитом, то эта убыль снижалась бы с ростом температуры, так как значения адсорбции и сорбции веществ, как правило, уменьшаются с увеличением температуры.

В случае дополнительного снижения количества смолы в присутствии доломита только за счет адсорбции и абсорбции компонентов смолы следовало бы ожидать прироста массы образцов доломита с течением времени. Однако их взвешивание по окончании экспериментов показало, что величина конечной массы доломита совпадала полностью со значением начальной массы. Данное обстоятельство указывает на то, что наблюдаемое в опытах ускорение убыли массы смолы в присутствии образцов доломита обусловлено его каталитическим воздействием на данный процесс.

**Кинетика разложения смолы.** Анализ экспериментальных данных, обсуждаемых в настоящей работе, показал, что кинетика термического разложения смолы может быть описана с приемлемой точностью на основании уравнения, предложенного автором [9], для описания кинетики реакции карбонизации оксида кальция:

$$\frac{dX}{dt} = k \left( 1 - \frac{X}{X_u} \right)^n, \quad (2)$$

где  $X$  – степень превращения, определяемая выражением (1);  $k$  – константа скорости разложения смолы;  $X_u$  – предельная степень превращения;  $n$  – параметр, равный 1.

Интегрирование уравнения (2) при  $n=1$  дает следующее выражение:

$$X = X_u \left[ 1 - \exp \left( - \frac{kt}{X_u} \right) \right], \quad (3)$$

которое можно преобразовать относительно  $k$ :

$$k = \frac{X_u}{t} \ln \left[ 1 - \frac{X}{X_u} \right]. \quad (4)$$

Значения констант скорости гомогенного разложения смолы, констант скорости разложения смолы в присутствии доломита, а также констант скорости каталитического разложения смолы приведены в табл. 4. Значения констант скорости каталитического разложения смол, представленные в таблице, рассчитаны на основании соотношения

$$k_c = k_\Sigma - k_g. \quad (5)$$

Здесь  $k_c$  – константа скорости каталитического разложения смолы,  $k_\Sigma$  – константа скорости разложения смол в случае присутствия в реакционной зоне доломита,  $k_g$  – константа скорости гомогенного разложения смол. Соотношение (5) основано на представлении об одновременном протекании гомогенного и гетерогенного процессов разложения смолы. Аррениусовская зависимость константы скорости гомогенного разложения смолы ( $k_g$ ), значения которой представлены во второй строчке табл. 4, приведена на рис. 3.

Т а б л и ц а 4. Константы скорости разложения смолы (мин<sup>-1</sup>)

Условия эксперимента	T, °C			
	500	600	700	850
Гомогенное разложение	0,03611	0,1987	0,3932	0,8091
Присутствие доломита	0,06558	0,2965	0,6237	1,2727
Каталитическое разложение	0,02948	0,09781	0,2305	0,4636

Аппроксимация методом наименьших квадратов значений константы скорости термического разложения доломита (табл. 4) дает

$$\ln(k_g) = -7,58975 \frac{1000}{T} + 6,74717. \quad (6)$$

Точность аппроксимации определяется следующими величинами:

$$R^2 = 0,957, \quad p = 0,022. \quad (7)$$

Коэффициент, стоящий перед обратной температурой в выражении (6), определяет угол наклона зависимости (рис. 3). Умножение его величины на газовую постоянную  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) и фактор 1000 определяет значение энергии активации  $E$  реакции, равное 63100 Дж/моль.

Свободный член зависимости (6) определяет значение предэкспоненциального фактора константы скорости, описывающего скорость термического разложения доломита в изученных условиях. Он равен  $8,52 \cdot 10^2$  мин<sup>-1</sup>.

Использование приведенных выше значений энергии активации и предэкспоненциального фактора приводит к следующим аррениусовским уравнениям, определяющим величины константы скорости разложения смолы в гомогенном процессе:

$$k_g = 8,52 \cdot 10^2 \exp\left(-\frac{63100}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (8)$$

Аррениусовская зависимость константы скорости каталитического разложения смолы ( $k_c$ ) показана на рис. 3, б.

Аппроксимация методом наименьших квадратов значений константы скорости термического разложения доломита (табл. 4) дает следующую зависимость:

$$\ln(k_c) = -6,88243 \frac{1000}{T} + 5,476. \quad (9)$$

Точность аппроксимации определяется таким образом:

$$R^2 = 0,989, \quad p = 0,0055. \quad (10)$$

Использование значений коэффициентов зависимости (9) позволяет вычислить значение энергии активации каталитического разложения смолы, равное 57200 Дж/моль (57,2 кДж/моль),

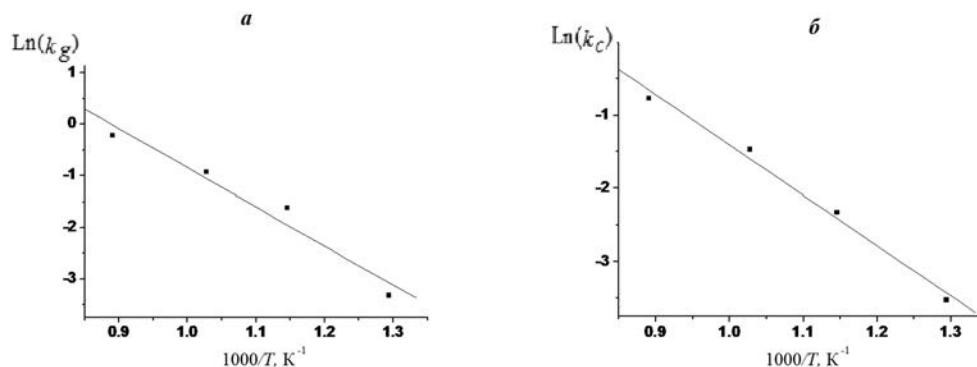


Рис. 3. Аррениусовская зависимость константы скорости гомогенного (а) и каталитического (б) разложения пиролизной смолы

которое согласуется с данными других исследователей. Так, согласно [10], величина энергии активации каталитического разложения смолы в присутствии различных гетерогенных катализаторов, соответствующая константе скорости первого порядка, составляет от 30 до 97 кДж/моль.

Использование коэффициентов аппроксимации (9) дает для расчета значений константы скорости каталитического разложения смолы в присутствии доломита следующую формулу:

$$k_c = 2,39 \cdot 10^2 \exp\left(-\frac{57200}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (11)$$

Сравнение выражений (8) и (11) показывает, что величина энергии активации каталитического разложения смолы примерно на 6 кДж/моль меньше, чем значение энергии активации гомогенного процесса, что указывает на каталитический эффект.

Как следует из приведенных выше результатов, внесение в реакционную зону образца доломита привело к росту скорости разложения смолы, образовавшейся в процессе пиролиза древесных опилок примерно в 2 раза по сравнению со скоростью гомогенного процесса. Столь малый прирост скорости разложения объясняется недостаточным количеством доломита в реакционной зоне. Как известно, скорость гетерогенного катализа зависит не только от активности катализатора, но также и от величины поверхности катализатора, доступной реагентам. Это позволяет повысить скорость гетерогенной каталитической реакции путем увеличения количества катализатора в реакционной зоне. В первом приближении можно считать, что активная поверхность катализатора прямо пропорциональна его массе. Поэтому можно ожидать, что применение засыпки частиц доломита таких размеров и такой массы, которые были использованы в опытах, описанных в настоящей работе, приведет к росту степени разложения смолы. Например, использование засыпки частиц с массой, превышающей в 100 раз массу частиц доломита, изученных в настоящей работе, приведет к повышению скорости каталитического разложения смолы примерно в 100 раз. Согласно данным табл. 1, при температуре 850 °С примерно две трети исходного количества смолы разложилось за время порядка 1 мин. Осуществление этого процесса в реакторе с засыпкой частиц доломита с общей массой, превышающей массу частиц, изученных в настоящей работе, примерно в 100 раз, привело бы к повышению скорости каталитического разложения смолы примерно в 100 раз и, следовательно, к снижению времени разложения смолы до 1 с. Проведенные исследования позволяют подтвердить перспективность природных доломитов Беларуси для создания системы очистки продуктов термохимической конверсии биомассы от смолы.

**Заключение.** Результаты экспериментального исследования, выполненного в изотермических условиях на лабораторной установке при температурах 500, 600, 700 и 850 °С, показали, что природные доломиты Беларуси повышают скорость термического разложения смолы, образовавшейся в процессе пиролиза древесной биомассы. Установлено, что данный эффект обусловлен каталитическим влиянием природных доломитов на реакции термического разложения смолы. Доступность и дешевизна природных доломитов в Беларуси позволяют использовать их для очистки продуктов пиролиза и газификации от образующихся тяжелых углеводородов.

#### 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. – P. 87–102.
2. 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
3. Biomass Gasifier Tars: Their Nature, Formation and Conversion / T. A. Milne, N. Abatzoglou, R. J. Evans // NREL Technical Report (NREL/TP-570-25357), November 1998.
4. 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 / M. Garcia-Perez. – Washington State University Edition, June 2008.
5. A Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. Milestone Completion Report / D. Dayton // NREL/TP-510-32815, (2002), 27 p.
6. 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. – P. 6911–6919.

7. Лесные ресурсы как возобновляемый энергетический потенциал Беларуси / А. И. Ковалевич // *Материалы международного семинара экспертов* (Минск, 22–24 февраля 2011 г.). – Минск: Беларуская навука. 2011. – С. 101–114.
8. Полезные ископаемые Беларуси: К 75-летию БелНИГРИ / Редкол.: С. П. Гудак [и др.]. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2002. – С. 395–398.
9. Lee, D. K. An apparent kinetic model for the carbonation of calcium oxide by carbon dioxide / D. K. Lee // *Chem. Eng. J.* – 2004. – Vol. 100. – P. 71–77.
10. Commercial steam reforming catalysts to improve biomass gasification with steam-oxygen mixtures. Catalytic tar removal / M. P. Aznar [et al.] // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 1998. – Vol. 37. – P. 2668–2680.

## References

1. Bridgwater, A.V. (2003), "Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass", *Chemical Engineering Journal*, vol. 91, pp. 87–102.
2. Evans, R.J. and Milne, T.A. (1987), "Molecular Characterization of the Pyrolysis of Biomass. 1. Fundamentals", *Energy and Fuels*, vol. 1 (2), pp.123–138.
3. Milne, T. A., Evans, R. J. and Abatzoglou, N. "Biomass Gasifier "Tars": Their Nature, Formation, and Conversion", Golden, Colorado, available at: <http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc681431/>, (Accessed 4.10. 2016).
4. Garcia-Perez, M. (2008), "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", Washington State University, available at: <http://www.pacificbiomass.org/documents/TheFormationOfPolyaromaticHydrocarbonsAndDioxinsDuringPyrolysis.pdf>, (Accessed 4.10. 2016).
5. Dayton, D. (2002), "A Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. Milestone Completion Report", available at: <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32815.pdf>, (Accessed 4.10. 2016).
6. El-Rub, Z.A., Bramer, E.A. and Brem, G. (2004), "Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 43, pp. 6911–6919.
7. Kovalevich, A.I. (2011), "Forests as a renewable energy potential of Belarus", *Materialy mezhdunarodnogo seminarov ekspertov (Minsk, 22–24 fevralya 2011 g.)* [Proceedings of the International Seminar of Experts (Minsk, February 22–24, 2011)], *Belaruskaya navuka*, Minsk, BY, pp. 101–114.
8. Gudak, S.P., Sinichkina, A.M. and Khomich, P.Z. (ed.) (2002), *Poleznye iskopaemye Belarusi* [Minerals Belarus], *Adukatsyya i vykhavanne*, Minsk, BY.
9. Lee, D.K. (2004), "An apparent kinetic model for the carbonation of calcium oxide by carbon dioxide", *Chemical Engineering Journal*, vol. 100, pp. 71–77.
10. Aznar, M.P., Caballero, M.A., Gil, J., Martin, J.A. and Carella, J. (1997), "Commercial steam reforming catalysts to improve biomass gasification with steam-oxygen mixtures. Catalytic tar removal", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 7, pp. 2668–2680.

## Информация об авторах

*Малько Михаил Владимирович* – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института энергетики НАН Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [mikhailvm@bas-net.by](mailto:mikhailvm@bas-net.by)

*Асадчий Андрей Николаевич* – научный сотрудник Института энергетики НАН Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [asadchyi@tut.by](mailto:asadchyi@tut.by)

*Василевич Сергей Владимирович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией Института энергетики НАН Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [svasilevich@yandex.ru](mailto:svasilevich@yandex.ru)

*Дегтерев Дмитрий Валентинович* – старший научный сотрудник Института энергетики НАН Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [ddegterov@mail.ru](mailto:ddegterov@mail.ru)

## Для цитирования

Исследование кинетики термического разложения пиролизной смолы / М. В. Малько [и др.] // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2016. – № 4. – С. 84–90.

## Information about the authors

*Malko Mikhail Vladimirovich* – Ph. D. (Physics and mathematics), Leading Researcher of the Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Academicheskaya str., building 2, 220072, Minsk, Belarus). E-mail: [mikhailvm@bas-net.by](mailto:mikhailvm@bas-net.by)

*Asadchyi Andrei Nikolaevich* – researcher of the Institute of Power Engineering of the National academy of Sciences of Belarus (15, Academicheskaya str. building 2, 220072, Minsk, Belarus). E-mail: [asadchyi@tut.by](mailto:asadchyi@tut.by)

*Vasilevich Siarhei Vladimirovich* – Ph. D. (Engineering) Assistant Professor, Head of laboratory of the Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Academicheskaya str., building 2, 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [svasilevich@yandex.ru](mailto:svasilevich@yandex.ru)

*Degterov Dmitry Valentinovich* – Senior researcher of the Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Academicheskaya str., building 2, 220072, Minsk, Belarus). E-mail: [ddegterov@mail.ru](mailto:ddegterov@mail.ru)

## For citation

Malko M. V., Asdchyi A. N., Vasilevich S. V., Degterov D. V. Study of the kinetics of pyrolytic tar thermal decomposition. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, physical-technical series. 2016, no. 4. pp. 84–90.