

УДІК 662.7:552.57

**В.Н. Шевкопляс /к.х.н./**

ГУ «Институт физико-органической химии и углехимии» (Донецк)

**Л.Ф. Бутузова /д.х.н./**

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

**Г.Н. Бутузов /к.х.н./, В.А. Печень**

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫХОДА ПЕРВИЧНОЙ СМОЛЫ ПО СОСТАВУ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ

*На основании данных дериватографии проведен пиролиз полного ряда твердых топлив ( $C^{daf}=44,3...93,70\%$ ) при температуре  $T_{max}$ , (установленной по кривой ДТГ) и подсчитан материальный баланс процесса. Предложены новые корреляционные зависимости между содержанием  $C^{daf}$  в твердом топливе, температурой  $T_{max}$  и выходом смолы пиролиза  $SM^{daf}$ , а также уравнение множественной регрессии с включением квадратичных членов, которое адекватно описывает эксперимент. Полученные результаты дают основания для усовершенствования лабораторного метода полукоксования с учетом температуры  $T_{max}$  для каждого конкретного из твердых горючих ископаемых и применения его для полного ряда твердых топлив, включая углеобразователи, которые до настоящего времени совместно с углями не изучались.*

**Ключевые слова:** углеобразователи, угли ряда метаморфизма, продукты пиролиза при температуре  $T_{max}$ , уравнения линейной регрессии, взаимосвязь между  $C^{daf}$ ,  $T_{max}$ ,  $SM^{daf}$ .

### Постановка проблемы

Для решения ряда фундаментальных и практических задач углехимии требуется выявление общих закономерностей изменения состава, структуры и свойств твердых горючих ископаемых (ТГИ) в природных условиях углеобразования и в различных технологических процессах переработки.

Развитие этого направления требует проведения исследований, направленных на разработку новых экспресс-методов определения показателей, наилучшим образом отражающих структуру, свойства и технологические характеристики ТГИ.

### Анализ последних исследований и публикаций

Проведенные исследования показали, что сочетание двух термических методов (дериватография и пиролиз) позволяет выявить генетическую взаимосвязь между представителями всего ряда метаморфизма и исходным органическим материалом – прекурсорами угля (лигнин, торф, древесина, целлюлоза), которые принимают непосредственное участие в процессе углеобразования и несут обширную первоначальную информацию о структуре ТГИ [1...4]. Данное направление в углехимии является весьма перспективным, так как создает научные основы для

разработки новых технологий по переработке твердых топлив и целенаправленного получения продуктов различного агрегатного состояния и назначения.

Ранее нами предложен новый показатель качества топлив – температура максимума эндоэффекта основного разложения угля на дериватограмме –  $T_{max}$  [5]. Показано, что температура  $T_{max}$  является важной характеристической константой каждого конкретного топлива, которая не только указывает на соответствующее положение угля в ряду углефикации, но и отражает его основные физико-химические характеристики.

### Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является установление взаимосвязей между показателем  $T_{max}$ , характеризующим термоустойчивость ТГИ, степенью их обуглероженности ( $C^{daf}$ ) и важной технологической характеристикой топлива – выходом смолы пиролиза ( $SM^{daf}$ ); расчет основных статистических характеристик (коэффициентов корреляции, дисперсии), расчет прогнозирующих уравнений, связывающих три указанных показателя, полученных при температуре  $T_{max}$ , предварительно установленной по дериватограмме каждого конкретного угля.

$SM^{daf}$  обычно определяют в условиях стандартного полукоксования (ГОСТ). Будучи про-

мышленным методом переработки топлив, полукоксование одновременно является важным лабораторным методом изучения структуры и термической устойчивости углей. Однако оценка химической природы ТГИ по выходу продуктов полукоксования возможна лишь в том случае, если образующиеся продукты разложения являются первичными, т.е. не успевают вступать во вторичные взаимодействия. Следовательно, очень важно провести пиролиз в мягких условиях. Таковыми, по нашему мнению, являются: максимальная температура нагрева, соответствующая  $T_{max}$ , и постоянное удаление образующихся продуктов из зоны пиролиза. Интервал основного термического разложения, определяемый по температурам начала и конца эндоефекта на дериватограмме, находится в температурном интервале полукоксования и является важнейшей стадией большинства процессов конверсии ТГИ, изучение которой необходимо для понимания механизма пиролиза и оптимизации его условий.

Выход первичного дегтя не всегда можно получить прямым определением, поэтому актуальным является разработка принципов его расчета.

### Основной материал исследования

Для достижения поставленной цели был проведен отбор, подготовка и анализ серии образцов в диапазоне от углеобразователей до антрацитов, выполнен их дериватографический анализ и последующий пиролиз при  $T_{max}$  [6]. Полученный массив экспериментальных данных использован для статистической обработки данных.

Пиролиз исследуемых образцов проводили при нормальном давлении. Навеску топлива в количестве 5...10 г (фракция меньше 0,5 мм) загружали в реактор объемом 20 см<sup>3</sup> с неподвижным слоем, вакуумировали и нагревали со скоростью 25 °С/мин до температуры максимума основного термического разложения топлива ( $T_{max}$ ), которая была предварительно определена экспериментально по дериватограмме с использованием стандартной методики [7], и выдерживали при конечной температуре в течение 10 мин. Это время было достаточным, чтобы образующиеся при данных условиях эксперимента парогазовые продукты полностью вышли из зоны пиролиза [8]. Образовавшиеся в процессе термодеструкции газообразные продукты собирали в газометре, конденсат – в колбе-приемнике, а твердый остаток – в реакторе. Выход продуктов пиролиза определяли весовым методом и рассчитывали материальный баланс процесса [9].

Полученные данные представлены в табл. 1, на основании которой рассчитаны статистические характеристики.

Анализ данных табл. 1 показывает закономерное снижение выхода смолы, начиная от углеобразователей и далее в ряду углефикации от бурых углей до каменных и антрацитов. Кроме того, прослеживается взаимосвязь между величинами  $T_{max}$ ,  $C^{daf}$  и  $SM^{daf}$  для всего ряда изученных образцов. Углеобразователи при пиролизе дают максимально высокий выход первичной смолы от 20,3 до 29,5 %  $daf$  в довольно узком диапазоне изменения  $T_{max}$  (275...330 °С). Начиная с бурых углей выход смолы резко снижается (8,2...3,6 %  $daf$ ), а величина  $T_{max}$  растет (365...405 °С).

У каменных углей выход первичной смолы продолжает закономерно снижаться – от 3,7 %  $daf$  для длиннопламенных до 1,3 %  $daf$  для тощих углей. Температура  $T_{max}$  для каменных углей повышается в ряду: Д-К-Т от 405 до 475 и 550 °С соответственно.

Выход первичной смолы из антрацитов составляет 0,1 %  $daf$ , а температура  $T_{max}$  имеет максимальное значение – 625 °С. Графические изображения полученных зависимостей представлены на рис. 1...3.

Характер полученных кривых показывает, что вне зависимости от степени метаморфизма и генетического типа углей по восстановленности ТГИ представляют собой непрерывный ряд органических веществ, характеризующихся определенной общностью структуры.

Для описания количественной взаимосвязи между параметрами  $C^{daf}$ ,  $T_{max}$  и  $SM^{daf}$  были применены традиционные методы корреляционного и регрессионного анализа накопленных данных. При этом для каждой независимой переменной опробовали линейный и параболический тип моделей, а также полиномиальные уравнения, включающие квадратичные эффекты.

Уравнения линейной регрессии для функций  $SM^{daf}=f(T_{max})$ ,  $SM^{daf}=f(C^{daf})$ ,  $T_{max}=f(C^{daf})$  имеют вид:

$$y=a_0+a_1x_1, \quad (1)$$

где  $a_0$  и  $a_1$  – эмпирические коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов.

Соответствующие уравнения представлены в табл. 2 функциями 1...3. Как видно из табл. 2, только зависимость  $SM^{daf}$  от  $C^{daf}$  (функция 2) удовлетворительно описывается в рамках такого подхода. Найденный коэффициент корреляции ( $R$ ) в этом случае равен 0,917. Другие зависимо-

сти не являются строго линейными, так как коэффициент корреляции для них составляет 0,756 и 0,880.

В целом для всех исследуемых функций (1...7) наибольшая величина парного коэффициента корреляции характерна для квадратичного эффекта, а следующая по убыванию – для линейного эффекта определенного показателя.

Таким образом, более точное описание зависимостей между рассматриваемыми параметрами получено с использованием уравнения двухпараметровой регрессии:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2, \quad (2)$$

где переменная  $x_2$  представляет собой квад-

рат  $x_1$ .

Из литературы [10...12] известно, что с помощью нелинейных функций, как правило, удается адекватно описать широкий спектр корреляционных зависимостей и построить достаточно надежные прогностические модели.

Применение параболической функции (функции 4...7, табл. 2) позволяет увеличить коэффициент корреляции до 0,975 (функция 5).

Судя по величине  $R$ , все рассмотренные квадратичные зависимости можно использовать для удовлетворительного прогноза состава и технологических характеристик как углей всего ряда метаморфизма, так и углеобразователей в тех случаях, когда известен только один из исследуемых параметров:  $C^{daf}$ ,  $T_{max}$  или  $SM^{daf}$ .

Табл. 1. Данные пиролиза твердых топлив при температуре  $T_{max}$ , время изотермической выдержки – 10 мин

Образцы	$C^{daf}$ , %	$T_{max}$ , °C	Продукты пиролиза, % $daf$				Конверсия, %
			Вода	Смола	Твердые	Газы	
Целлюлоза	44,3	320	32,3	29,5	32,7	5,5	67,3
Древесина (хвойная)	51,6	330	23,5	26,3	40,9	9,3	59,1
Древесина (листвен.)	52,8	310	26,1	20,3	42,5	11,1	57,5
Торф (Укр.)	56,8	275	10,0	16,0	73,6	0,4	26,4
Торф (Приб.)	57,0	300	18,4	19,3	58,7	3,6	41,3
Лигнин	59,0	295	17,5	17,8	56,4	8,3	43,6
Б <sup>1)</sup>	62,4	400	8,5	8,2	77,3	6,0	22,3
Б <sup>2)</sup>	64,1	380	5,5	8,1	78,1	8,3	21,9
Б <sup>3)</sup>	65,4	375	6,1	9,2	74,1	10,6	25,9
Б <sup>4)</sup>	66,8	370	5,6	5,9	79,0	9,5	21,0
Б <sup>5)</sup>	69,6	395	7,5	6,5	71,3	14,7	28,7
Б <sup>6)</sup>	71,0	365	6,5	7,1	77,3	9,1	22,7
Б <sup>7)</sup>	74,3	405	6,4	3,6	79,5	10,5	20,5
Д, I <sub>4</sub>	76,6	425	3,3	2,9	82,4	11,4	17,6
Д, I <sub>2</sub>	76,2	405	7,8	3,7	82,6	5,9	17,4
Д, I <sub>4</sub>	79,0	405	3,6	3,2	86,0	7,2	14,0
Г, I <sub>3</sub>	82,2	425	3,8	3,2	80,7	4,3	11,3
Г, I <sub>1</sub>	82,7	425	3,0	2,9	88,7	5,4	11,3
Г, k <sub>5</sub>	83,5	440	2,8	1,9	92,4	2,9	7,6
Г, m <sub>3</sub>	84,3	450	2,7	1,5	93,3	2,5	6,7
Ж k <sub>8</sub>	85,4	445	2,1	2,4	93,4	2,1	6,6
Ж, I <sub>1</sub>	86,1	440	3,1	3,1	90,6	4,2	10,4
Ж, m <sub>2</sub>	87,4	455	6,4	2,2	89,9	1,5	10,1
К, k <sub>8</sub>	88,6	475	6,0	1,3	86,5	6,2	13,5
ОС, I <sub>6</sub>	88,9	475	1,6	1,0	95,8	1,6	4,2
Т, h <sub>3</sub>	89,7	525	2,5	1,6	90,9	5,0	9,1
Т, h <sub>8</sub>	90,3	550	2,2	1,3	95,2	1,3	4,8
А, h <sub>8</sub>	93,6	625	1,4	0,1	97,4	1,1	2,6
А, h <sub>8</sub>	93,7	625	1,1	0,1	98,3	0,5	1,7

Источники БУ: <sup>1)</sup> ш. Верболозовская; <sup>2)</sup> КWB «Belchatow»; <sup>3)</sup> ш. Новомиргородская; <sup>4)</sup> Константиновский разрез; <sup>5)</sup> Протопоповский разрез; <sup>6)</sup> КWB «Туrow»; <sup>7)</sup> Канско-Ачинский, Березовское

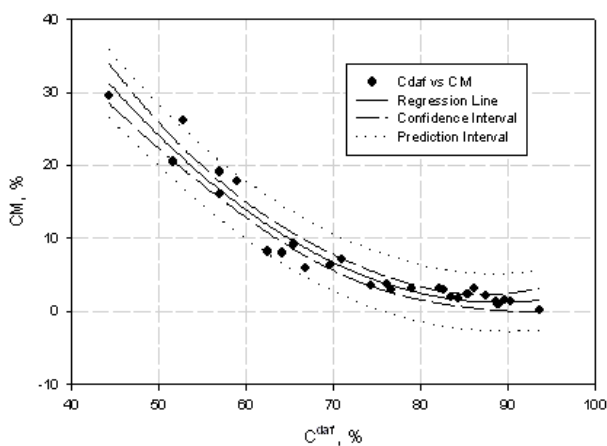


Рис. 1. Зависимость выхода первичной смолы от содержания  $C^{daf}$  в твердом топливе

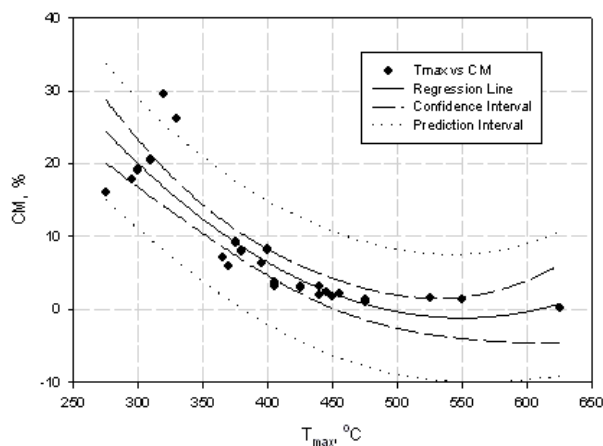


Рис. 2. Зависимость выхода первичной смолы от температуры  $T_{max}$  твердых горючих ископаемых

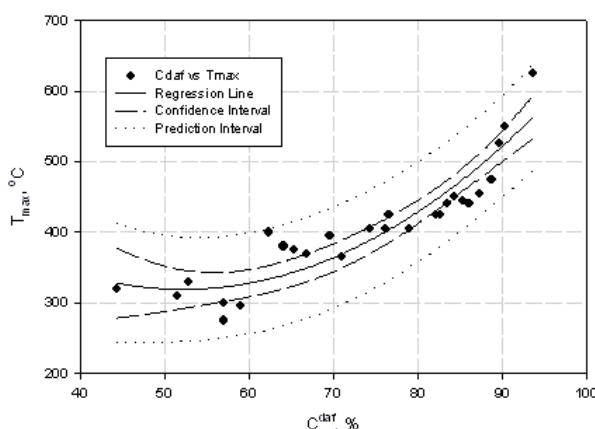


Рис. 3. Зависимость между температурой  $T_{max}$  и содержанием углерода в твердом топливе

Далее были проанализированы уравнения вида:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3, \quad (3)$$

где  $x_3$  – квадрат одной из независимых переменных ( $x_1$  или  $x_2$ ).

Как видно из данных табл. 2, для функций 10...13, в случае применения уравнений вида (3), достигается незначительное улучшение корреляционной связи, если  $x_3 = (C^{daf})^2$ , и ухудшение при  $x_3 = (CM^{daf})^2$ .

Таким образом, дальнейшее усложнение уравнений путем включения в них дополнительных членов нецелесообразно, особенно с практической точки зрения, так как это усложняет расчеты, но не приводит к существенному увеличению коэффициента корреляции.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что наиболее тесная корреляционная связь наблюдается в случае зависимостей  $CM^{daf} = f(C^{daf})$  (линейная и параболическая функции 2 и 5), имеющих коэффициенты корреляции 0,917 и 0,975 соответственно. Зависимости  $CM^{daf} = f(T_{max})$  и  $T_{max} = f(C^{daf})$  более корректно опи-

сываются уравнениями множественной регрессии с включением квадратичных членов (функции 4 и 6). Сравнение коэффициентов  $a_i$  и  $R$ , приведенных в табл. 2, показывает, что определяющим влиянием на другие параметры обладает независимый фактор  $C^{daf}$ , являющийся количественной характеристикой исходного топлива.

Функции 10...13, связывающие все три рассмотренные характеристики твердых топлив ( $C^{daf}$ ,  $T_{max}$  и  $CM^{daf}$ ), позволяют достаточно надежно прогнозировать значение одной из искомым характеристик, основываясь на экспериментально полученных значениях других. Например, вид зависимости  $T_{max} = f(C^{daf}, CM^{daf})$  на рис. 4 показывает, что величины  $T_{max}$  лежат на расчетной параболической поверхности, которая описывается функцией 12. Она включает как линейные, так и квадратичные члены, при этом достигается достаточно высокий коэффициент корреляции ( $R=0,948$ ).

График зависимости между вычисленными по функции 12 и экспериментальными величинами  $T_{max}$  (рис. 5) показывает, что фактические и расчетные точки хорошо ложатся на прямую, т.е. функция 12 адекватно описывает эксперимент.

Табл. 2. Результаты регрессионного анализа исследованных зависимостей (1)...(3) для углей и углеобразователей

Функция	Параметры				Коэффициент $a_i$				R	$S_0$
	y	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$		
1	$CM^{daf}$	$T_{max}$	-	-	$36,5 \pm 5,0$	$-0,07 \pm 0,01$	-	-	0,756	5,4
2	$CM^{daf}$	$C^{daf}$	-	-	$46,5 \pm 3,3$	$-0,53 \pm 0,04$	-	-	0,917	3,3
3	$T_{max}$	$C^{daf}$	-	-	$11 \pm 43$	$5,5 \pm 0,6$	-	-	0,880	42,2
4	$CM^{daf}$	$T_{max}$	$(T_{max})^2$	-	$101 \pm 15$	$-0,37 \pm 0,07$	$0,0003 \pm 0,0001$	-	0,873	4,1
5	$CM^{daf}$	$C^{daf}$	$(C^{daf})^2$	-	$120 \pm 10$	$-2,7 \pm 0,3$	$0,015 \pm 0,002$	-	0,975	1,9
6	$T_{max}$	$C^{daf}$	$(C^{daf})^2$	-	$706 \pm 180$	$-15 \pm 5$	$0,14 \pm 0,04$	-	0,927	34,1
7	$T_{max}$	$CM^{daf}$	$(CM^{daf})^2$	-	$527 \pm 14$	$-26 \pm 4$	$0,7 \pm 0,1$	-	0,891	41,1
8	$C^{daf}$	$T_{max}$	$CM^{daf}$	-	$57 \pm 7$	$0,07 \pm 0,01$	$-1,0 \pm 0,1$	-	0,960	4,1
9	$CM^{daf}$	$T_{max}$	$C^{daf}$	-	$46 \pm 3$	$0,02 \pm 0,02$	$-0,6 \pm 0,1$	-	0,923	3,2
10	$CM^{daf}$	$T_{max}$	$C^{daf}$	$(T_{max})^2$	$73 \pm 12$	$-0,13 \pm 0,07$	$-0,5 \pm 0,1$	$0,0001 \pm 0,0001$	0,936	3,0
11	$CM^{daf}$	$T_{max}$	$C^{daf}$	$(C^{daf})^2$	$140 \pm 11$	$-0,029 \pm 0,009$	$-3,1 \pm 0,3$	$0,019 \pm 0,002$	0,982	1,6
12	$T_{max}$	$C^{daf}$	$CM^{daf}$	$(C^{daf})^2$	$1846 \pm 400$	$-40 \pm 9$	$-9,5 \pm 3,1$	$0,28 \pm 0,05$	0,948	29,5
13	$T_{max}$	$C^{daf}$	$CM^{daf}$	$(CM^{daf})^2$	$152 \pm 176$	$4 \pm 2$	$-12 \pm 7$	$0,4 \pm 0,2$	0,909	38,5

Абсолютная ошибка предсказания величин  $T_{max}$  составляет не более 30 °С (относительная ошибка меньше 10...15 %), что вполне достаточно для использования этого уравнения в практических целях. При этом вкладом квадратичного члена  $(T_{max})^2$  можно пренебречь без ущерба для точности такого прогноза.

Таким образом, после проведения анализа различных форм корреляционной связи с ис-

пользованием линейных и квадратичных функций установлено наличие множественной корреляции между тремя исследуемыми характеристиками топлива.

Следовательно, указанные характеристики изменяются совместно, по-видимому, имеют генетическую связь и могут рассматриваться как следствие единой причины – изменения степени углефикации ТГИ.

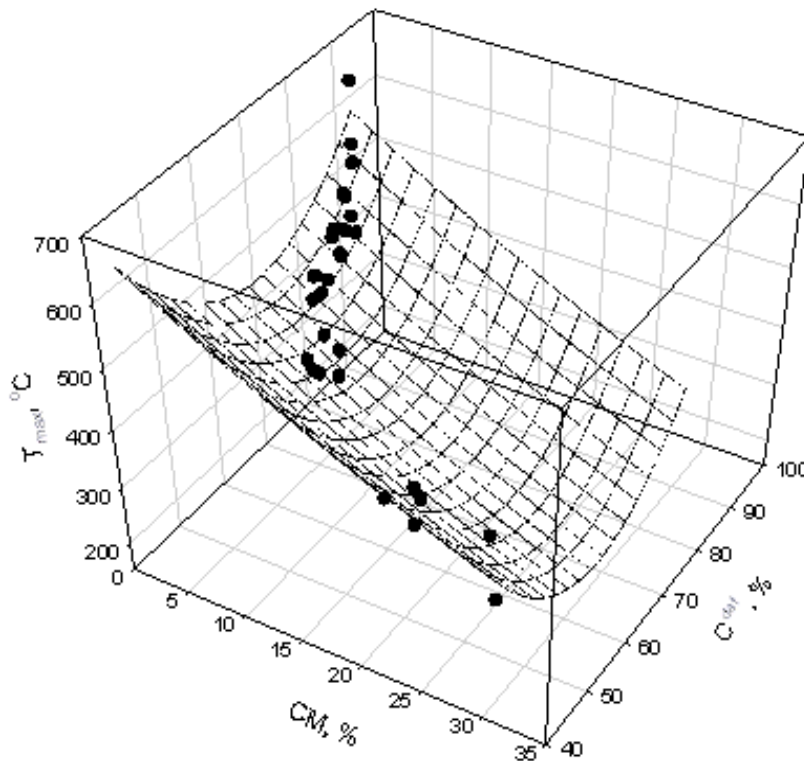


Рис. 4. Параболическая поверхность, описываемая предложенной двухпараметровой функцией (12):  $T_{max} = f(C^{daf}, (CM^{daf})^2)$ , и соответствующие экспериментальные точки

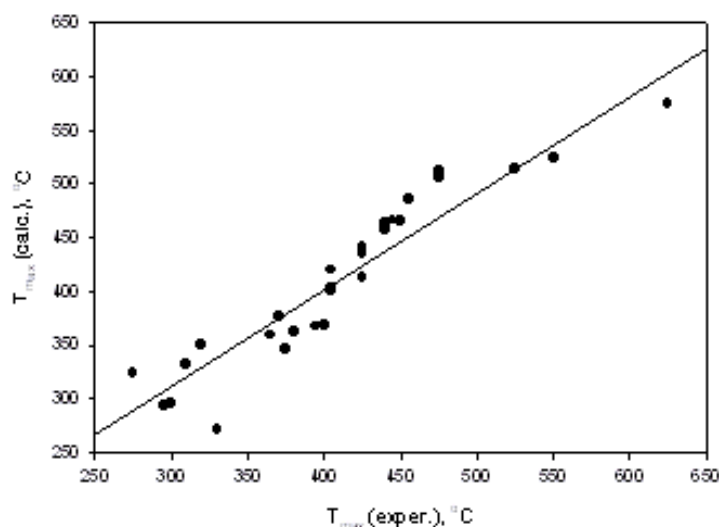


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и вычисленных по функции (12) величин температуры  $T_{max}$  для полного ряда твердых топлив

**Выводы**

Проведенные исследования однозначно доказывают, что определенная методом дериватографии температура максимума основного термического разложения ( $T_{max}$ ) на кривой ДТГ является важнейшей количественной характеристикой твердого топлива. Ее можно применять для оценки состава, свойств и технологических характеристик полного ряда ТГИ (углей и углеобразователей) и использовать в качестве одного из классификационных параметров твердых топлив.

Предложены новые математические зависимости между составом твердых топлив, значением их температуры  $T_{max}$  и выходом  $СМ^{daf}$ .

Полученные результаты дают возможность усовершенствовать стандартный лабораторный метод определения выхода продуктов полукоксования с учетом экспериментальных значений  $T_{max}$  и применять его для полного ряда твердых топлив, включая углеобразователи ( $С^{daf}=44,3...59,0\%$ ), которые до настоящего времени совместно с углями не изучались.

**Список литературы**

1. Статистические характеристики состава и свойств низкометаморфизованных углей Донбасса разных генетических типов / Л.Ф. Бутузова [и др.] // Углехимический журнал. – 2003. – №3-4. – С. 7-12.
2. Применение расширенного базиса структурных параметров для расчета энтальпии и атомизации соединений, моделирующих строение углей / И.А. Иванов [и др.] // Химия твердого топлива. – 2003. – №1. – С. 30-41.
3. Иванов, И.А. Регрессивные зависимости технологических показателей углей от их элементного состава / И.А. Иванов, С.Г. Гага-

- рин, А.М. Гюльмалиев // Химия твердого топлива. – 2003. – №5. – С. 9-16.
4. Камнева, А.И. Теоретические основы химической технологии горючих ископаемых / А.И. Камнева, В.В. Платонов. – М.: Химия, 1990. – С. 155-156.
5. Дериватографические исследования углеобразователей и углей ряда метаморфизма / В.Н. Шевкопляс [и др.] // Вестник ДонНТУ. – 2019. – №3(17). – С. 82-91.
6. Шевкопляс, В.Н. Оценка качественных характеристик углей по данным дериватографии и пиролиза / В.Н. Шевкопляс, С.Н. Ляшук, Л.Ф. Бутузова // Вопросы химии и химической технологии. – 2005. – №3. – С. 180-184.
7. Скляр, М.Г. Химия твердых горючих ископаемых / М.Г. Скляр, Ю.Б. Тютюнников. – Киев: Вища школа, 1985. – 247 с.
8. Аронов, С.Г. Комплексная химико-технологическая переработка углей / С.Г. Аронов, С.Г. Скляр, Ю.Б. Тютюнников. – Киев: Техника, 1968. – 262 с.
9. ГОСТ 3168-96. Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода продуктов полукоксования (ИСО 647-74). – Введ. 1997-01-01. – К.: Госстандарт Украины, 1996. – 17 с.
10. Батунер, Л.М. Математические методы в химической технике / Л.М. Батунер, М.Е. Позин. – Л.: Химия, 1971. – 824 с.
11. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Статистика, 1973. – 561 с.
12. Шашков, В.Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия. – Оренбург: ГОУ ВПО «ОГУ», 2003. – 363 с.

**V.N. Shevkoplyas /Cand. Sci. (Chem.)/**

*Institute of Physical-Organic Chemistry and Carbon Chemistry (Donetsk)*

**L.F. Butuzova /Dr. Sci. (Chem.)/**

*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**G.N. Butuzov /Cand. Sci. (Chem.)/, V.A. Pechen**

*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

## MATHEMATICAL AND STATISTICAL MODELS FOR PREDICTING THE YIELD OF PRIMARY RESIN BY THE COMPOSITION OF SOLID FUELS

**Background.** *Semi-coking, as well as derivatography, are among the experimental methods of research that allow determining the technological characteristics of fuel by the quantitative yield of thermal degradation products, followed by a forecast of the directions of its most rational processing.*

**Materials and/or methods.** *This work is based on the study of a unique collection of solid fuel samples in the range from carbon-forming agents to anthracites ( $C^{daf}=44.3...93.70\%$ ). Their derivatographic analysis and subsequent pyrolysis performed at  $T_{max}$  temperature established by the derivatogram of each specific solid fuel (SF). The obtained set of experimental data is used to describe the quantitative relationship between the characteristics of the element composition ( $C^{daf}$ ), derivatography ( $T_{max}$  temperature value) and resin yield ( $CM^{daf}$ ) under solid fuel pyrolysis conditions at a strictly fixed  $T_{max}$  temperature for each specific SF. For this purpose, the authors used traditional methods of correlation and regression analysis. For each independent variable, linear and parabolic types of models tested as well as polynomial equations that include quadratic effects.*

**Results.** *New correlations between the parameters  $C^{daf}$ ,  $T_{max}$  and  $CM^{daf}$  proposed as well as a multiple regression equation with the inclusion of quadratic terms, which adequately describes the experiment. A quantitative description of the relationships between experimental values of  $C^{daf}$ ,  $T_{max}$  and  $CM^{daf}$  allows determining the  $T_{max}$  values with a relatively high degree of accuracy only based on data from elemental analysis of coals ( $C^{daf}$ ). At the same time, based on the experimental values of  $T_{max}$ , it is quite easy to estimate the carbon content ( $C^{daf}$ ) and the yield of pyrolysis resin ( $CM^{daf}$ ) from solid fuel without resorting to the appropriate experiment.*

**Conclusion.** *The research results make it possible to improve the standard method for determining the yield of semi-coking products (GOST 3168-93, ISO 647-74) and apply it both for coals of the entire range of metamorphism ( $C^{daf}=64.1...93.7\%$ ) and for carbon-forming agents ( $C^{daf}=44.3...59.0\%$ ), which have not been studied together with coals until now.*

*The proposed approach of the combined study of precursors of coal and coals of a metamorphism series could be the beginning of a systematic approach to jointly explore the full range of SF, which will more clearly articulate the scientific basis of combining them in a single classification.*

**Keywords:** *coal precursors, different coal rank, pyrolysis at  $T_{max}$  temperature, pyrolysis products, linear regression equations, relation between  $CM^{daf}$ ,  $T_{max}$  and  $C^{daf}$ .*

### Сведения об авторах

**Л.Ф. Бутузова**

SPIN-код: 7391-2663

Author ID: 7004736806

ORCID iD: 0000-0002-4232-3057

Телефон: +380 (50) 921-38-51

Эл. почта: ludmila.lfb@yandex.ru

**Г.Н. Бутузов**

SPIN-код: 48-4394

Author ID: 8701390000

Телефон: +380 (50) 589-74-89

Эл. почта: ludmila.lfb@yandex.ru

**В.А. Печень**

SPIN-код: 7601-7420

ORCID iD: 0000-0001-7488-5639

Телефон: +380 (95) 844-22-87

Эл. почта: vika.pechen.93@yandex.ua

**В.Н. Шевкопляс**

Author ID: 6603169954

Телефон: +380 (95) 633-03-15

Эл. почта: v-shevkoplyas@ukr.net

*Статья поступила 17.04.2020 г.*

*© В.Н. Шевкопляс, Л.Ф. Бутузова, Г.Н. Бутузов, В.А. Печень, 2020  
Рецензент д.х.н., проф. Ю.Б. Высоцкий*