

- датчик угла поворота колес служит для непрерывной обратной связи с системой управления машинотракторным агрегатом;

- гидравлический клапан получает электрические сигналы от контроллера и преобразует их в гидравлические, которые система использует для удержания машинотракторного агрегата на заданном курсе;

- подруливающее устройство обеспечивает параллельное вождение с точностью до 10 см;

- базовая станция передает поправки GPS-положения на GPS-приёмник машинотракторного агрегата через радиосвязи или GSM-модем для определения координат с высокой точностью (погрешность менее  $\pm 2$  см).

В настоящее время в республике на Ташкентском заводе сельскохозяйственной техники налаживается производство тракторов под брендом «Zamin», впервые снабженной системой параллельного вождения, разрабатываемым в АО «Конструкторско-технологический центр сельскохозяйственного машиностроения» совместно с Московским представительством «Trimble» в комплект которого входит:

- монитор GFX-750 (s/n 5722200124);

- навигационный контроллер-приемник Nav900 (s/n 5722400156);

- подруливающее устройство Trimble;

- электромотор SAM 200 (s/n 5825M66036);

- комплект кабельных жгутов и монтажных пластин и кронштейнов.

Этот трактор будет первой ласточкой во внедрении концепции точного земледелия в республике в части системы параллельного вождения и к нему разрабатывается набор базовых машин для сельскохозяйственных полевых работ. В перспективе рассматривается также вопрос внедрения автоматизированной системы рулевого управления, т.е. автопилота.

#### Использованные источники

1. Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие / В.И. Балабанов, С.В. Железова, Е.В. Березовский, А.И. Беленков, В.В. Егоров. – М.: Изд-во РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2013. –148 с.

2. Якушев В. В. Точное земледелие: теория и практика. – СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016 год. – 364 с.

3. Точное земледелие: ключевые технологии и концепции // <http://kas32.com/post/view/330>.

4. Новицкий И. Точное земледелие: принцип работы и перспективы // <https://xn--80ajgpcpbhkds4a4g.xn--p1ai/articles/tochnoe-zemledelie/>.

5. Юрченко О. Космические данные определяют точное земледелие // <https://www.apk-news.ru/kosmicheskie-dannye-opredelayut-tochnoe-zemledelie/>

6. Шевко Д. GPS, Интернет и трактор: точное земледелие как спасение человечества // <http://greenbelarus.info/articles/15-08-2017/gps-internet-i-traktor-tochnoe-zemledelie-kak-spasenie-chelovechestva>.

УДК 66.017: 669.783

## КЛАСТЕРНО-АССОЦИАТНАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ, ПЛОТНОСТИ И КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ГЕРМАНИЯ

*Бабагүл Б. С.,  
магистрант кафедры НТМ  
Макашева А.М.,  
д.т.н., профессор*

*Карагандинский государственный технический университет*

### АННОТАЦИЯ

В данной статье разработаны новые зависимости вязкости от температуры в полном диапазоне жидкого состояния для германия. Концепция хаотизированных частиц создаёт возможность определить с достаточно высокой точностью температурную зависимость динамической вязкости и плотности. Разработанные кластерно-ассоциатные модели температурной зависимости динамической вязкости и плотности использованы для построения на их основе соответствующей модели кинематической вязкости жидкого германия. Проведена проверка полученных моделей. Выяснилось, что модели адекватно описывают экспериментальные данные. Приведено согласование всех трех характеристик не только по связывающему их фундаментальному соотношению, но и по единой природе и форме согласуемых температурных зависимостей.

**Ключевые слова:** концепция хаотизированных частиц, распределение Больцмана, ван-дер-ваальсовое притяжение, динамическая вязкость, плотность, кинематическая вязкость, реперные точки, диапазон жидкого состояния, степень ассоциации кластеров, кластерно-ассоциатная модель

### ВВЕДЕНИЕ

Авторами монографии [1] были разработаны новые зависимости вязкости от температуры в полном диапазоне жидкого состояния для германия, основанные на концепции хаотизированных частиц.

Согласно этой концепции, в соответствии с фундаментальным распределением Больцмана, вязкое течение рассматривается как разрушение ассоциатов путем преодоления сил ван-дер-ваальсового притя-

жения между кластерами, что в принципе не противоречит существующим представлениям о вязком течении и подчиняется данной зависимости:

$$\eta = \eta_1 (T_1/T)^{a_2 (T_2/T)^b}, \quad (1)$$

где  $\eta_1$  – реперная точка динамической вязкости при соответствующей температуре  $T_1$  (К);  $a$  – степень ассоциации кластеров,  $b$  – мера понижения степени ассоциации кластеров.

Для идентификации показателей  $a$  и  $b$  необходимо иметь вторую и третью реперные точки  $\eta_2, T_2, \eta_3, T_3$

$$a = a_2 (T_2/T)^b, \quad (2)$$

$$a_2 = \frac{\ln(\eta_2/\eta_1)}{\ln(T_1/T_2)}, \quad (3)$$

$$a_3 = \frac{\ln(\eta_3/\eta_1)}{\ln(T_1/T_3)}, \quad (4)$$

$$b = \frac{\ln(a_3/a_2)}{\ln(T_2/T_3)}. \quad (5)$$

Для поиска возможного экстремума этой функции (скорее всего, минимума) необходимо ее продифференцировать и приравнять нулю. С этой целью сложную показательную-степенную функцию (1) целесообразно перевести в логарифмическую форму, поскольку экстремумы исходной и логарифмической форм соответствует одним и тем же значением аргумента:

$$\ln \eta = \ln \eta_1 + a_2 \left( \frac{T_2}{T} \right)^b \ln \left( \frac{T_1}{T} \right) \quad (6)$$

Дифференцирование и приравнение нулю приводит к виду

$$\frac{d \ln \eta}{dT} = -a_2 T^{-b-1} \left[ b \ln \left( \frac{T_1}{T} \right) + 1 \right] = 0 \quad (7)$$

В котором множитель в квадратных скобках раскрывается как

$$T_{\eta, \min} = T_1 e^{1/b} \quad (8)$$

Здесь  $T_{\eta, \min}$  обозначает температуру, при которой по модели (1) достигается минимальное значение вязкости. Это значение должно быть сопоставлено с критической температурой жидкости  $T_{cr}$ , после которой она (жидкость) не может как отдельная фаза существовать ни при каких давлениях. Поэтому для адекватного описания температурной зависимости вязкости в полном диапазоне жидкого состояния должно соблюдаться условие  $T_{\eta, \min} \geq$

$T_{cr}$ . При нарушении этого условия необходима корректировка показателя  $b$  по условию  $T_{\eta, \min} = T_{cr}$ , из которого следует, согласно (7),

$$b = -1 / \ln \left( T_1 / T_{cr} \right) = 1 / \ln \left( T_{cr} / T_1 \right) \quad (9)$$

Реперные точки целесообразно выбирать соответственно в начале, середине и в конце экспериментального массива  $\eta_i, T_i$ . В этом случае можно, не обрабатывая весь экспериментальный массив, ограничиться расчетом  $a_2, a_3$  и  $b$  с дальнейшим введением необходимых величин в модель (1) и вычислением  $\eta$  для сопоставления со всеми экспериментальными значениями по коэффициенту корреляции.

В качестве примера адекватного отображения динамической вязкости кластерно-ассоциатной модели проведём анализ данных погерманию, которое достаточно широко применяется в химической промышленности, медицине, электронике, военной промышленности, энергетической промышленности и так далее.

#### Проверка адекватности кластерно-ассоциатной модели динамической вязкости германия

В справочнике [2] приведены данные, имеющиеся для достаточно полного диапазона жидкого состояния, простирающегося далеко за точку кипения при атмосферном давлении, почти до критической точки.

По германию в [2] со ссылкой на первоисточник [4] приводится сводка значений динамической вязкости, а в [3] содержатся данные по кинематической вязкости и плотности, относящиеся только к четырем одинаковым для ии температурам. Из них рассчитали величины динамической вязкости по связывающей их формуле  $\eta = \nu \rho$  и выбрали три реперные точки:  $T_1 = 1218$  К,  $\eta_1 = 0,744$  мПа·с;  $T_2 = 1283$  К,  $\eta_2 = 0,633$  мПа·с;  $T_3 = 1403$  К,  $\eta_3 = 0,546$  мПа·с. Расчетное уравнение динамической вязкости жидкого свинца пришло вид:

$$\eta = 0.744 (1218/T)^{3.1077 (1283/T)^{3.92318}}, \text{ мПа·с.} \quad (10)$$

Температуры плавления и кипения германия из разных источников: по [2] – 1210,7 и 2973 К, по [3] – 1211,4 и 3120 К, а по [5] – 1211,4 и 3106 К (приняты для расчетов). Наша оценка  $T_{cr} \approx 4979$  К.

Коэффициент корреляции (10) с обеими сводками данных по [3] и [4] составил  $R = 0,9858$  при  $t_R = 114 > 2$ . Наибольшее отклонение расчетных данных относится к температуре 1223 К в области кристаллизации германия, но и оно не превышает 5%. К тому же здесь имеет место «стыковка» двух сводок литературных данных по верхним значениям вязкости. Однако более существенно то, что экстраполяция (10) в область кипения и далее в кри-

тическую точку сопровождается повышением вязкости, что указывает на нарушение условия  $\eta \leq \eta_{min}$  для предлагаемой модели типа (1). В расчетном варианте (10)  $T_{n,min} = 6507K < T_b = 3106K < T_{cr} \approx 4979K$ , вследствие чего зависимость (6) может быть использована только для интерполяции в интервале от  $T_m$  до  $\sim 1500K$ .

Полное отображение вязкости в данном случае, как и для кремния, возможно при отнесении точки минимума к критической точке, что согласно формуле (9), обеспечивается расчетом соответствующего показателя  $b$ . При этом достаточно использования двух реперных точек, которые целесообразно взять из двух массивов литературных данных:  $T_1 = 1248K$ ,  $\eta_1 = 0,680$  мПа·с;  $T_2 = 1403K$ ,  $\eta_2 = 0,546$  мПа·с. Тогда  $b = 1/\ln(4979/1248)$

$= 0,72272$  и более универсальное расчетное уравнение примет вид

$$\eta = 0,68(1248/T)^{1,8683(1403/T)^{0,72272}}, \text{ мПа·с} \quad (11)$$

Коэффициент корреляции его с обеими сводками данных по вязкости оказался столь же высоким,  $R = 0,98272$  при  $t_R = 95 > 2$ , причем наибольшее отклонение расчетного значения вязкости в области кристаллизации (при 1218 K) оказалось даже меньше, чем по (10), не превышая 4%. Это позволяет рекомендовать зависимость (11) для полного описания жидкого состояния германия.

Сравнение справочных, экспериментальных и расчетных данных приведено в табл. 1

Таблица 1 – Динамическая вязкость жидкого германия по [3], [4], (10) и (11)

$T, K$	$\nu \cdot 10^6$ [3], м <sup>2</sup> /с	$\rho$ [3], кг/м <sup>3</sup>	$\eta$ [3], мПа·с	$\eta$ [4], мПа·с	$\eta$ (10), мПа·с	$a$	$\eta$ (11), мПа·с	$a$
$T_m = 1211,4$	-	-	-	-	0,760	3,89	0,723	2,08
1218	0,135	5510	-	-	0,744	3,81	0,715	2,07
1223	-	-	-	0,700	0,733	3,75	0,709	2,06
1248	-	-	-	0,680	0,684	3,46	0,680	2,03
1251	0,122	5480	-	-	0,679	3,43	0,677	2,03
1273	-	-	-	0,645	0,646	3,21	0,653	2,00
1283	0,116	5460	-	-	0,633	3,11	0,644	1,99
1293	-	-	-	0,620	0,621	3,01	0,634	1,98
1323	-	-	-	0,590	0,592	2,76	0,607	1,95
1348	-	-	-	0,570	0,574	2,56	0,586	1,92
1393	-	-	-	0,550	0,550	2,25	0,553	1,88
1403	0,101	5410	-	-	0,546	2,19	0,546	1,87
1423	-	-	-	0,530	0,539	2,07	0,533	1,85
1473	-	-	-	0,510	0,528	1,81	0,504	1,80
$T_b = 3106$	-	-	-	-	0,680?	0,097	0,261	1,05
$T_{cr} \approx 4979$	-	-	-	-	0,728?	0,015	0,242	0,75

#### Проверка полученной модели плотности жидкого германия

По жидкому германию в справочнике [3] приведена сводка значений плотности, из которой для идентификации кластерно-ассоциатной модели выбраны реперные точки:  $T_1 = 1218K$ ,  $\rho_1 = 5510$  кг/м<sup>3</sup>;  $T_2 = 1573K$ ,  $\rho_2 = 5310$  кг/м<sup>3</sup>;  $T_3 = 1873K$ ,  $\rho_3 = 5170$  кг/м<sup>3</sup>. В результате построена зависимость:

$$\rho = 5510(1218/T)^{0,144552(1573/T)^{-0,135294}}, \text{ кг/м}^3, \quad (12)$$

$$cT_{\rho,max} = 0,75K \ll T_m = 1211,4K.$$

Сопоставление справочных и расчетных данных представлено в таблице 2.

Близость коэффициента корреляции единице ( $R = 0,99826$  при  $t_R = 640 \gg 2$ ) обеспечивает надежность экстраполяции зависимости (12) в область очень высоких температур.

Таблица 2 – Плотность жидкого германия по [3] и (12)

$T, K$	$\rho$ [3], кг/м <sup>3</sup>	$\rho$ (12), кг/м <sup>3</sup>	$a$	$T, K$	$\rho$ [3], кг/м <sup>3</sup>	$\rho$ (12), кг/м <sup>3</sup>	$a$
$T_m = 1211,4$	-	5514	0,140	1873	5170	5170	0,148
1218	5510	5510	0,140	2000	-	5117	0,149
1251	5480	5489	0,140	2500	-	4933	0,154
1283	5460	5470	0,141	$T_b = 3106$	-	4750	0,159
1403	5410	5400	0,142	3500	-	4649	0,161
1573	5310	5310	0,145	4000	-	4534	0,164
1673	5260	5261	0,146	$T_{cr} \approx 4978$	-	4344	0,169

### Согласование температурных зависимостей динамической, кинематической вязкости и плотности на основе концепции хаотизированных части

Фундаментальная связь динамической ( $\eta$ , Па·с), кинематической ( $\nu$ , м<sup>2</sup>/с) вязкости и плотности жидкости ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>) при любой температуре определяется соотношением

$$\eta = \rho\nu. \quad (13)$$

Что касается конкретного выражения температурной зависимости для каждой переменной, то они остаются разобшенными по физическим моделям и достаточно строго выражаются только аппроксимирующими уравнениями несопоставимой точности и возможности экстраполяции в область высоких температур [3].

### Расчет и проверка кинематической вязкости жидкого германия через кластерно-ассоциатные модели динамической вязкости и плотности

Кинематическая вязкость жидкого германия выражается через динамическую вязкость  $\eta$  (6) и плотность  $\rho$  (7) как:

$$\nu = 10^{-3} \frac{0,68(1248/T)^{1,8683(1403/T)^{0,72272}}}{5510(1218/T)^{0,144552(1573/T)^{-0,135294}}}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (14)$$

В [3] содержится сводка значений  $\nu$ , сравнение с которой результатов расчета по (14) приведено в табл. 3.

Коэффициент корреляции составил  $R = 0,97473$  при  $t_R = 52 > 2$ , а в более широкий температурный диапазон исследований (240 К).

Таблица 3 – Кинематическая вязкость жидкого германия по (14) и [3]

$T, K$	$\nu$ (14), 10 <sup>7</sup> м <sup>2</sup> /с	$\nu$ [4], 10 <sup>7</sup> м <sup>2</sup> /с	$T, K$	$\nu$ (14), 10 <sup>7</sup> м <sup>2</sup> /с	$T, K$	$\nu$ (14) 10 <sup>7</sup> м <sup>2</sup> /с
$T_m = 1211,4$	1,312	-	1500	0,917	3200	0,546
1218	1,298	1,350	1700	0,784	3300	0,544
1233	1,267	1,310	1900	0,702	3400	0,542
1243	1,248	1,240	2100	0,648	3500	0,541
1251	1,233	1,220	2300	0,611	3600	0,540
1268	1,202	1,190	2500	0,586	3700	0,53968
1283	1,177	1,160	2700	0,569	3800	0,53967
1363	1,060	1,060	2900	0,557	3900	0,53997?
1403	1,012	1,010	3000	0,522	4000	0,541?
1458	0,955	0,980	$T_b = 3106$	0,549		

### Выводы

Разработанные кластерно-ассоциатные модели температурной зависимости динамической вязкости и плотности использованы для построения на их основе соответствующей модели кинематической вязкости жидкого германия, которая адекватно описывает экспериментальные данные. А также приведено согласование всех трех характеристик не только по связывающему их фундаментальному соотношению, но и по единой природе и форме согласуемых температурных зависимостей.

Преимущество кластерно-ассоциатной модели состоит в возможности прогнозирования поведения вязкости, как в области низких температур, так и высоких вплоть до температуры кипения.

### Список литературы

1. Малышев В.П., Бектурганов Н.С., Турдукожаева (Макашева) А.М. Вязкость, текучесть и плотность веществ как мера их хаотизации. – М.: Научный мир, 2012. – 288 с.
2. Панфилович К.Б. Тепловое излучение и поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов. Казан. гос. технол. ун-т, Казань, 2009.
3. Свойства элементов: Справ. изд. – в 2-х кн. Кн. 1/ Под ред. Дрица М.Е. – 3-е изд., перераб. доп. – М.: Руда и Металлы, 2003. – 448 с.
4. Глазов М.Н., Петров Д.А. Исследование температурной зависимости вязкости германия // Известия АН СССР, ОТН – 1958. № 2. – С. 15-19.

5. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. – М.: Современная школа, 2005. – 608 с.

6. Хобдабергенов Р.Ж., Козин Л.Ф., Требухов А.А. и др. Вязкость и электропроводность свинца, серебра, и сплавов серебро-свинец в жидком состоянии // Вестник АН Каз ССР. – 1975. - № 6. – С. 41-46.

7. Малышев В.П., Турдкужаева (Макашева) А.М. Равновесная самоорганизация наноразмерных кластеров твердой фазы в жидкости // Энциклопедия инженера-химика. – 2009. - №. – С. 2-8; № 5. – С. 2-6; № 6. – С. 5-11.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ УГЛЕЙ ТУВЫ И ИХ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ.

Монгуш Григорий Романович,  
Младший научный сотрудник\*

\*ФГБУН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, г.Кызыл

### АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены результаты сравнения кривых термогравиметрии (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) топливных брикетов и их исходных углей. В результате анализа было показано, что процессы изготовления топливных брикетов существенно влияют на температурные показатели при термоокислительной деструкции углей, что в свою очередь положительно влияет на процесс сжигания и выход продуктов топлива в печах.

**Ключевые слова:** Реакционная способность, уголь, топливный брикет, термогравиметрия, сжигание угля.

### STUDY OF BURNABILITY OF COALS AND COAL BRIQUETTES OF TUVA.

#### ABSTRACT

The present paper considers comparison results of the curves of thermogravimetry (TG) and differential scanning calorimetry (DSC) of coals and coal briquettes. Result analysis demonstrated that the making process of coal briquettes have a significant effect on temperature indicators during thermal-oxidative coal destruction that has a positive effect on the combustion process and yield of coal products in fire-stoves.

**Keywords:** burnability, coal, fuel briquette, thermogravimetry, coal combustion.

#### Введение

В правительстве Тувы вышло распоряжение по отбору инвестиционных проектов, предлагающих лучшее технологическое решение по уменьшению выбросов в атмосферу г. Кызыла загрязняющих веществ. Министерству природных ресурсов и Роспотребнадзору поручено усилить контроль за соблюдением природоохранного законодательства, совместно с мэрией Кызыла провести инвентаризацию малых котельных и внести предложения по их модернизации, регулярно вести мониторинг за выбросами Кызылской ТЭЦ. [1]

Одним из технологических решений проблемы в борьбе с вредными выбросами в атмосферу города видят в применении бездымных топливных брикетов, в частности для отопления в печах частного сектора. За этот проект взялась строительная компания ООО «Хайдып девелопмент», усилиями которой была выпущена первая пробная партия из угля Каа-Хемского и Межегейского месторождения в 2015 году, изготовленная на Балахтинском заводе угольных брикетов. [2]

Были проведены пробные сжигания в печах частного сектора и получены положительные отзывы потребителей, однако не было проведено официального измерения и анализа на предмет газообразных и пылевидных выбросов.

**Цель данной работы** – исследование реакционной способности в процессе термоокислительной деструкции топливных брикетов из каменных углей Тувы.

#### Методика исследования

В качестве сырья были исследованы каменные угли 1ГЖ Каа-Хемского и Ж Межегейского месторождения (*технические характеристики (см.табл.1) получены стандартными методами анализа*) и их топливные брикеты.

Для получения и сравнения кривых термогравиметрии (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) каждый из образцов были исследованы на синхронном термическом анализаторе Netzsch STA 409 C в воздушной среде. Температура нагревания до 1100 °С, скорость подачи воздуха - 30 мл/мин; защитный газ азот – 10 мл/мин.

Обработка результатов проводилась при помощи оригинального программного обеспечения Proteus analysis фирмы Netzsch, которая позволяет исследовать гравиметрические и калориметрические данные. Типичные результаты дифференциального термического анализа (ДТА) образцов представлены на рисунках 1 и 2.

В ходе анализа регистрировались потери массы образцов в интервалах температур (см. табл.2).

#### Результаты