

## КЛАСТЕРНО-АССОЦИИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ВЯЗКОСТИ СРЕДНЕЙ ФРАКЦИЙ НЕФТЕШЛАМА (АТАСУ-АЛАШАНЬКОУ)

С. Тянах<sup>1\*</sup>, М. И. Байкенов<sup>1</sup>, Ма Фэн-Юнь<sup>2</sup>, А.М. Макашева<sup>3</sup>, Т.О. Хамитова<sup>4</sup>, В.П. Малышев<sup>3</sup>, А. Молдабаев<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Карагандинский университет имени Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан,

<sup>2</sup>Синьцзянский университет, Урумчи, Китайская Народная Республика,

<sup>3</sup>Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, Караганда, Казахстан,

<sup>4</sup>Казахский сельскохозяйственный исследовательский университет им. Сейфуллина, Астана, Казахстан,

<sup>5</sup>Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан,  
*e-mail: saika\_8989@mail.ru*

Научная новизна работы состоит в отображении температурной зависимости вязкости кластерно-ассоциативной вероятностной математической моделью, иерархическая структура которой адекватна физической природе агрегации частиц без учета их конкретного строения, но с учетом изменения степени их ассоциации с повышением температуры. Расчет данных проводился на основе нового кластерно-ассоциативного уравнения, которое было выведено в рамках концепции хаотизированных частиц. Приведены расчетные данные в температурном диапазоне от температуры начала кипения и конец кипения. Показано, что степень ассоциации кластеров при повышении температуры закономерно понижается, равная в среднем трех-четырёх-частичной компоновке кластеров в ассоциате. Проведено сопоставление кластерно-ассоциативной модели с уравнением Френкеля в логарифмических координатах.

**Ключевые слова:** катализатор, микросиликат, термодинамика, нефтешлам, вероятностно-детерминированное планирование, вязкость, никель, кобальт

## МҰНАЙ ШЛАМЫНЫҢ ОРТА ФРАКЦИЯЛАРЫНЫҢ ТҮТҚЫРЛЫҒЫНЫҢ КЛАСТЕРЛІК-ҚАУЫМДАСТЫРЫЛҒАН МОДЕЛІ (АТАСУ-АЛАШАНЬКОУ)

С. Тянах<sup>1\*</sup>, М. И. Байкенов<sup>1</sup>, Ма Фэн-Юнь<sup>2</sup>, А. М. Макашева<sup>3</sup>, Т. О. Хамитова<sup>4</sup>, В. П. Малышев<sup>3</sup>, А. Молдабаев<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды қ., Қазақстан,

<sup>2</sup>Синьцзян университеті, 830046 Үрімші, Қытай Халық Республикасы,

<sup>3</sup>Химия-металлургия институты. Ж. Әбішева, Қарағанды қ., Қазақстан,

<sup>4</sup>С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан,

<sup>5</sup>Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан,  
*e-mail: saika\_8989@mail.ru*

Жұмыстың ғылыми жаңалығы тұтқырлықтың температуралық тәуелділігін кластерлік-ассоциативті ықтималдық математикалық модельмен бейнелеуден тұрады, оның иерархиялық құрылымы бөлшектердің нақты құрылымын ескермей, бірақ температураның жоғарылауымен олардың Ассоциация дәрежесінің өзгеруін ескере отырып, агрегацияның физикалық сипатына сәйкес келеді. Деректерді есептеу хаотикалық бөлшектер тұжырымдамасы аясында алынған жаңа кластерлік-ассоциациялық теңдеу негізінде жүргізілді. Қайнауын басталуы мен қайнауын соңғы температуралық диапазондағы болжамды мәліметтері келтірілген. Температура көтерілген кезде кластерлердің ассоциация дәрежесі табиғи түрде төмендейтіні көрсетілген,

бұл ассоциациядағы кластерлердің орта есеппен үш-төрт-ішінара орналасуына тең. Кластерлік ассоциация моделін логарифмдік координаттардағы Френкель теңдеуімен салыстыру жүргізілді.

**Түйінді сөздер:** катализатор, микросиликат, термодинамика, мұнай шламы, ықтималдық - детерминирленген жоспарлау, тұтқырлық, никель, кобальт

## CLUSTER-ASSOCIATE MODEL FOR THE VISCOSITY OF OILSLUDGE (ATASU-ALASHANKOU) MIDDLE FRACTIONS

S. Tyanakh<sup>1\*</sup>, M.I. Baikenov<sup>1</sup>, Ma Feng-Yun<sup>2</sup>, A. M. Makasheva<sup>3</sup>, T. O. Khamitova<sup>4</sup>, V.P. Malyshev<sup>3</sup>; A. Moldabaev<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Karaganda University Named after Academician E.A. Buketov, Karaganda, Kazakhstan,

<sup>2</sup>Xinjiang University, Xinjiang, China

<sup>3</sup>Chemical and Metallurgical Institute named after J. Abishev, Karaganda, Kazakhstan,

<sup>4</sup>NCJSC «S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University»Seifullin, Astana, Kazakhstan,

<sup>5</sup>Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: saika\_8989@mail.ru

The scientific novelty of the work consists in displaying the temperature dependence of viscosity by a cluster-associated probabilistic mathematical model, the hierarchical structure of which is adequate to the physical nature of particle aggregation without taking into account their specific structure, but taking into account changes in the degree of their association with an increase in temperature. The calculation of the data was carried out on the basis of a new cluster-associative equation, which was derived within the framework of the concept of chaotic particles. The calculated data in the temperature range from the boiling point and the end of boiling are given. It is shown that the degree of cluster association naturally decreases with increasing temperature, equal on average to three-four-part cluster arrangement in the associate. The cluster-associative model is compared with the Frenkel equation in logarithmic coordinates.

**Keywords:** catalyst, microsilicate, thermodynamics, oil sludge, probabilistic-deterministic design, viscosity, nickel, cobalt

**Введение.** В стремлении к устойчивым энергетическим решениям и эффективному использованию ресурсов переработка нефтешламов стала многообещающим направлением. Одним из важнейших аспектов этой переработки является определение вязкости полученных жидких фракций, поскольку это непосредственно влияет на текучесть, обращение и переработку этих материалов. С этой целью разработана комплексная модель вязкости, способная охватывать весь температурный диапазон, от начальной температуры кипения до конца температуры кипения, приобретает решающее значение. В этой статье рассматривается метод создания такой модели, особое внимание уделяется модели вязкости, связанной с кластерами кластерно-ассоциированной модели вязкости (КАМВ), применяемой к фракции, полученная в результате гидрогенизации нефтешлама. Вязкость является важнейшим физическим свойством, которое играет значительную роль в поведении и эксплуатационных характеристиках различных жидкостей, включая мас-

ла, топливо и другие нефтепродукты. Он измеряет сопротивление жидкости течению, или, проще говоря, насколько густой или разреженной является жидкость. На вязкость влияет внутреннее трение между молекулами внутри жидкости.

Авторами [1-2] на основе концепции хаотизированных частиц (КХЧ) была разработана кластерно-ассоциатная модель вязкости (КАМВ) жидкости в полном диапазоне от температуры. Показана детальная разработка иерархической кластерно-ассоциатной математической модели вязкости. Модель основана на равновесном распределении Больцмана и поэтому рассматривается как хаосочувствительное свойство жидкости, присущее ей не только в движении, но и в покое. Для адаптации кластерно-ассоциатной модели к экспериментальным данным разработаны определенные приемы обработки данных для идентификации неизвестных параметров модели [1-2].

В настоящей работе исследовано влияние нанокатализатора на основе микросиликата, с нанесенным

никелем и кобальтом на вязкость средней фракции полученная из нефтешлама в процессе гидрогенизации нефтешлама (Атасу-Алашанькоу).

Разработка кластерно-ассоциированной модели вязкости (КАМВ) для средних фракций, образующихся в результате гидрирования нефтешлама, включает в себя создание математического представления, описывающего взаимосвязь между молекулярной структурой компонентов нефтешлама, степенью гидрирования и результирующей вязкостью. Эта модель предназначена для прогнозирования вязкости гидрированного нефтешлама на основе характеристик его молекулярных компонентов и процесса гидрирования.

Цель работы разработка кластерно-ассоциатной модели вязкости полученных фракции с температурой конца кипения до 350°C из нефтешлама и из гидрогенизата в зависимости от количества добавляемых нанокатализаторов (микрокремнезем содержащий никель и кобальт) в процессе деструктивной гидрогенизации нефтешлама.

**Материалы и методы.** Объектом исследования для проведения экспериментальных работ по определению вязкости широкой фракции с температурой конца кипения до 350°C. Нефтешлам образовался в процессе транспортировки нефти по трубопроводу, предприятию «Казтрансойл» Западно-Казахстанских нефтей Республики Казахстан. Физико-химическая характеристика нефтешлама (Атасу-Алашанькоу), условия проведения экспериментов каталитической гидрогенизации нефтешлама и синтез нанокатализаторов представлены в работе [3-4].

Определение кинематической вязкости широкой фракции нефтешлама с температурой конца кипения до 350°C проводили при температуре 25°C, 30°C, 35°C с помощью автоматического вязкозиметра SYD-265B-1 (производство КНР), где в качестве образцов были выбраны фракции полученные из исходного нефтешлама и гидрогенизата. Образец 1 - исходная фракция с температурой конца кипения до 350°C полученная из нефтешлама, Образец 2 - фракция с температурой конца кипения до 350°C фракционированный из гидрогенизата (гидрогенизат получен в процессе гидрогенизации нефтешлама в присутствии нанокатализатора содержащий микрокремнезем с нанесенным кобальтом и никелем), Образец 3 - фракция с температурой конца кипения до 350°C фракционированный из гидрогенизата (гидрогенизат получен в процессе гидрогенизации нефтешлама в присутствии нанокатализатора содержащего

микрокремнезем с нанесенным кобальтом) [3].

Согласно этой концепции, в соответствии с фундаментальным распределением Больцмана течение рассматривается как разрушение ассоциатов кластеров, состоящих из кристаллоподвижных частиц. Разрушение происходит путем преодоления сил ван-дер-ваальсового притяжения между кластерами, что в принципе не противоречит существующим представлениям о вязком течении и подчиняется новой зависимости [5]:

$$\eta = \eta_1 \left( \frac{T_1}{T} \right)^a, \quad (1)$$

где  $\eta_1$  – реперная экспериментальная (справочная) точка динамической вязкости при температуре  $T_1$  (К), мПа·с;  $a$  – безразмерная степень ассоциации кластеров (в приближении ее постоянства). Для выражения температурной зависимости показателя  $a$  необходимо иметь вторую реперную точку  $\eta_2, T_2$

$$a = a_2 \left( \frac{T_2}{T} \right)^b, \quad (2)$$

где  $b$  – мера понижения степени ассоциации кластеров. Для идентификации показателя  $b$  используется третья реперная точка  $\eta_3, T_3$

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

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

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

Для металлов показатель  $b$  составляет не более единицы и принимается постоянным. Он трактуется как степень агрегации ассоциатов, слабо выраженной для неорганических веществ.

Таким образом, общая форма двухуровневой иерархической модели будет представлена следующим образом:

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

При этом КАМВ (6) можно определить как обобщенное полуэмпирическое, поскольку, сохраняя причастность к фундаментальному распределению Больцмана, в нем используются реперные значения (при  $T_1, T_2$  и  $T_3$ ).

Реперные точки целесообразно выбирать соответственно в начале, середине и в конце всего имеющегося экспериментального массива  $\eta_i, T_i$ . В этом случае можно ограничиться расчетом  $a_2, a_3$  и  $b$ , не обрабатывая весь экспериментальный массив, с дальнейшим введением необходимых величин в модель (6) и вычислением  $\eta$  для сопоставления со всеми экспериментальными значениями по коэффициенту корреляции.

**Результаты и обсуждение.** Для установления величины динамической вязкости нами был применен кластерно-ассоциатной модель, где в качестве исходных данных была использована величина вязкости определенная экспериментальным путем по нефтешламу и полученные фракции из гидрогенизата. В таблице 1 представлены экспериментальные величины вязкости образцов 1, 2, 3.

Таблица 1 - Исходные данные вязкости образцов 1, 2, 3

T, K	Образец 1, $\eta_1$ (э), мм <sup>2</sup> ·с <sup>2</sup>	Образец 2, $\eta_1$ (э), мм <sup>2</sup> ·с <sup>2</sup>	Образец 3, $\eta_1$ (э), мм <sup>2</sup> ·с <sup>2</sup>
298	2.45	1.53	1.42
303	2.19	1.44	1.29
308	2.16	1.4	1.23

Рассчитаем по имеющимся данным вязкость по КАМВ (6).

Из приведенного экспериментального массива данных таблица 1 величины вязкости ( $\eta_i$ ) и температуры ( $T_i$ ) они же были выбраны в качестве реперных точек  $T_1, \eta_1; T_2, \eta_2; T_3, \eta_3$ . По этим точкам с помощью формул (3)-(5) рассчитаны значения  $a_2$  и  $b$  (табл. 2) и в соответствии с моделью (6) получены расчетные уравнения вязкости.

Таблица 2 - Параметры КАМВ (6) по расчетным величинам вязкости образцов 1, 2, 3

Необходимые параметры	Образец 1	Образец 2	Образец 3
a2	6.74	3.64	5.77
b	34.76	18.53	17.24

Расчетные величины по вязкости исследуемых веществ приведены в таблицах 3-5.

Таблица 3 - Расчётные величины вязкости образец 1 по КАМВ (6)

T, K	$\eta_1$ (э), мПа·с	$\eta(7)$ , мПа·с	a
298	2.45	2.45	12.02
303	2.19	2.19	6.74
308	2.16	2.16	3.82

Таблица 4 - Расчетная величина по вязкости образец 2 по КАМВ (6)

T, K	$\eta_1$ (э), мПа·с	$\eta$ (8), мПа·с	a
298	1.53	1.53	4.96
303	1.44	1.44	3.64
308	1.40	1.40	2.69

Таблица 5 - Расчетная величина по вязкости образец 2 по КАМВ (6)

T, K	$\eta_1$ (э), мПа·с	$\eta$ (9), мПа·с	a
298	1.42	1.42	7.69
303	1.29	1.29	5.77
308	1.23	1.23	4.35

Для каждого образца приведены расчетные уравнения.

Для образца 1:

$$\eta = 2.45 \left( \frac{298}{T} \right)^{6.74 (303/T)^{34.76}}, \text{ мПа·с.} \quad (7)$$

Для образца 2:

$$\eta = 1.53 \left( \frac{298}{T} \right)^{3.64 (303/T)^{18.53}}, \text{ мПа·с.} \quad (8)$$

Для образца 3:

$$\eta = 1.42 \left( \frac{298}{T} \right)^{5.77 (303/T)^{17.24}}, \text{ мПа·с.} \quad (9)$$

Изменение вязкости для исследуемых образцов 1 показано на рисунке 1.

Как видно из таблиц 3-5 степень ассоциации кластеров а с ростом температуры закономерно понижается для всех веществ, соответствуя динамике разрушения ассоциатов. Необходимо отметить, что в данном случае для органических веществ понятия кластера и ассоциата будут отличаться от понятий для расплава металлических сплавов. В данном случае нужно за единицу кластера принять мономер, а ассоциат а - полимер, состоящий из соответствующих мономеров. Чем выше температура, тем короче длина цепочки или длина полимера. Следовательно, происходит деструкция вещества с улучшением его текучести.

Так как для построения парциально-кластерной модели вязкости были взяты имеющиеся три точки, то предлагаемые модели (6)-(9) формально полностью согласуются с экспериментальными величинами в рассматриваемых диапазонах, и коэффициент нелинейной множественной корреляции равен  $R = 1$ .

Однако полученные модели можно использовать только для ограниченного прогнозирования поведения веществ как в нижнем, так и в верхнем температурных диапазонах из-за недостатка экспериментальных точек (рисунок 1).

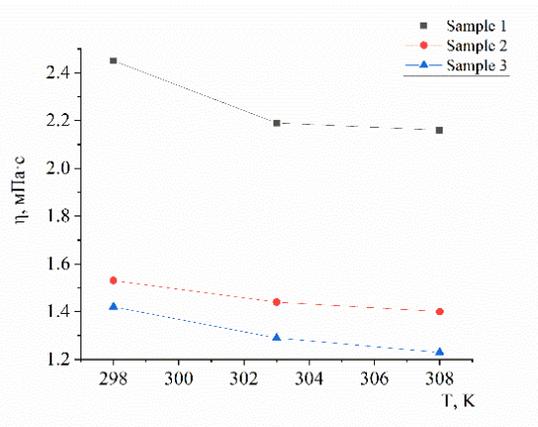


Рис. 1 - Зависимость динамической вязкости от температуры для исследуемых веществ, Образец 1, 2, 3 точки - экспериментальные данные, линии - по уравнениям (7)-(9)

Термодинамические характеристики исследуемых веществ при согласовании кластерно-ассоциатной модели с уравнением Френкеля

Для сравнения кластерно-ассоциатной модели вязкости с моделью Френкеля, а также взаимного согласования этих моделей и получения термодинамических характеристик данные из таблиц 3-5 представили в логарифмических координатах (таблицы 6-8 и рисунки 2-4).

Таблица 6 - Расчетные величины по вязкости образец 1 в логарифмических координатах

T, К	$10^3/T$	$\eta_1$ (э), мПа·с	$\ln\eta_1$ (э)	$\eta(7)$ , мПа·с	$\ln\eta(7)$
298	3.36	2.45	0.90	2.45	0.90
303	3.30	2.19	0.78	2.19	0.78
308	3.25	2.16	0.77	2.16	0.77

Таблица 7 - Расчетные величины по вязкости образец 2 в логарифмических координатах

T, К	$10^3/T$	$\eta_1$ (э), мПа·с	$\ln\eta_1$ (э)	$\eta(8)$ , мПа·с	$\ln\eta(8)$
298	3.36	1.53	0.43	1.53	0.43
303	3.30	1.44	0.36	1.44	0.36
308	3.25	1.40	0.34	1.40	0.34

Таблица 8 - Расчетные величины по вязкости образец 3 в логарифмических координатах

T, К	$10^3/T$	$\eta_1$ (э), мПа·с	$\ln\eta_1$ (э)	$\eta(9)$ , мПа·с	$\ln\eta(9)$
298	3.36	1.42	0.35	1.42	0.35
303	3.30	1.29	0.25	1.29	0.25
308	3.25	1.23	0.21	1.23	0.21

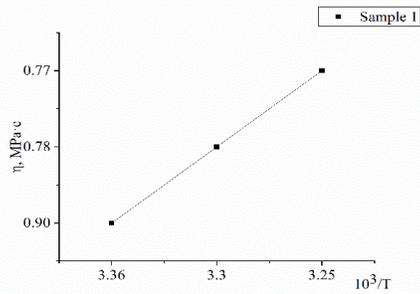


Рис. 2 - Логарифмическая зависимость вязкости образца 1 от обратной температуры  
Квадратики - экспериментальные данные, точки - по данным таблицы 6, прямая линия - по уравнению Френкеля

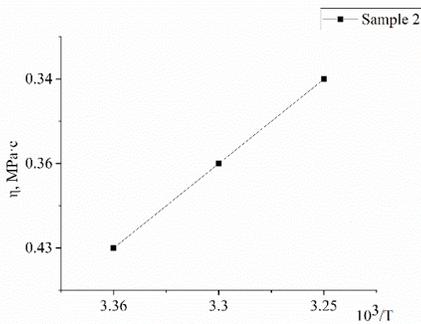


Рис. 3 - Логарифмическая зависимость вязкости образец 2 от обратной температуры  
Квадратики - экспериментальные данные, точки - по данным таблицы 7, прямая линия - по уравнению Френкеля

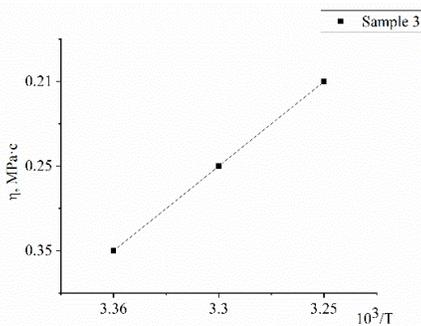


Рис. 4 - Логарифмическая зависимость вязкости образец 3 от обратной температуры  
Квадратики (или квадрат) – экспериментальные данные, точки – по данным таблицы 8, прямая линия – по уравнению Френкеля

В этих координатах близкие к прямолинейному размещению данных наблюдается во всем темпера-

турном диапазоне точек для образца 2 и 3. Для образца 1 экспериментальные точки расположены с явным разбросом от прямолинейности, что было заметно изначально по экспериментальным точкам. Однако обработка этих данных по методу наименьших квадратов полученное уравнение прямой оказалось достаточно значимой.

Значимое прямолинейное размещение данных дает право на определение энергии активации вязкого течения по уравнению Френкеля

$$\eta = \eta_0 e^{\frac{E_a}{RT}}, \quad (10)$$

где  $\eta_0$  и  $E_a$  - постоянные ( $\eta_0$  иногда рассматривают как функцию температуры);  $e$  - основание натуральных логарифмов;  $T$  - абсолютная температура;  $R$  - газовая постоянная.

Обработку данных по вязкости в логарифмических координатах по этому уравнению

$$\ln \eta = \ln \eta_0 + \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (11)$$

следует проводить методом наименьших квадратов при использовании расчетных данных по вязкости по модели (6), так как линеаризация основана на уравнении Френкеля, а не на КАМВ (6), обеспечивающей соответствие парциально-кластерной зависимости вязкости от температуры.

При этом в уравнении прямой  $y = ax + b$ :

$$y = \ln \eta, \frac{E_a}{R}, x = \frac{1}{T}, b = \ln \eta_0.$$

В результате получим

$$E_a = aR \text{ Дж/моль}, \eta_0 = e^b \text{ мПа·с.}$$

По образцу 1

$$\eta_0 = 0.049, E_a = 9.655 \text{ кДж/моль}, \quad (12)$$

$$\eta = 0.049 \cdot e^{\frac{9655}{RT}} \text{ мПа·с.}$$

Коэффициент корреляции кластерно-ассоциатной модели с уравнением Френкеля составил  $R = 0.8327$  при его значимости  $t_R = 2.72$  ( $t_R > 2$ ),  $D = R^2 = 0.6934$ . Это свидетельствует о близости результатов расчета вязкости по обеим моделям, рассматривающим эту характеристику с различных точек зрения - молекулярно-кинетической и вероятностной.

Результаты, полученные по кластерно-ассоциатной модели и по уравнению Френкеля для

образца 1 в полном диапазоне жидкого состояния приведены в таблице 9.

Таблица 9 - Сопоставление расчетные величины вязкости образец 1 по (7) и (12)

T, K	$\eta(7)$ , мПа·с	$\eta(12)$ , мПа·с
298	2.45	2.41
303	2.19	2.26
308	2.16	2.13

Уравнение Френкеля для образца 2:

$$\eta = 0.098 \cdot e^{\frac{6790}{RT}}, \text{ мПа·с.} \quad (13)$$

Коэффициент корреляции по экспериментальным данным составил  $R = 0.9612$  при значимости  $t_R = 12.63$  ( $t_R > 2$ ) и степени детерминации  $D = R^2 = 0.9239$ , что также свидетельствует о близости результатов расчета вязкости по обеим моделям.

Таблица 10 - Сопоставление расчетные величины вязкости образец 2 по (8) и (13)

T, K	$\eta(8)$ , мПа·с	$\eta(13)$ , мПа·с
298	1.53	1.52
303	1.44	1.46
308	1.40	1.39

Уравнение Френкеля для образца 3:

$$\eta = 0,017 \cdot e^{\frac{10981}{RT}}, \text{ мПа·с.} \quad (14)$$

Таблица 11 - Сопоставление расчетные величины вязкости образец 3 по (9) и (14)

T, K	$\eta(9)$ , мПа·с	$\eta(14)$ , мПа·с
298	1.42	1.41
303	1.29	1.31
308	1.23	1.22

Коэффициент корреляции по экспериментальным данным составил  $R = 0.9675$  при значимости  $t_R = 15.14$  ( $t_R > 2$ ) и степени детерминации  $D = 0.9361$ , что свидетельствует о близости двух моделей.

Таким образом, мы получили энергию активации для всех трех веществ: для образца 1  $E_a =$

9655 Дж/моль, для образца 2 - 6790 Дж/моль, для образца 3 - 10981 Дж/моль.

Также можно определить, сколько приходится энергии активации на 1 мономер. Для этого необходимо посчитать среднеинтегральное значение степени ассоциации кластеров.

Это значение  $\bar{a}$  может быть аналитически определено на основе формулы (2) в виде среднеинтегральной величины.

$$\bar{a} = \frac{a_2 T_2^b (T_{up}^{1-b} - T_l^{1-b})}{(1-b)(T_{up} - T_l)}, \quad (15)$$

где  $T_l$  - нижнее (low),  $T_{up}$  - верхнее (upper) значения температурного интервала.

Поскольку величина  $\bar{a}$  характеризует среднее число кластеров в ассоциате (или в нашем случае, для органического вещества, число мономеров в полимере), то по отношению  $E/\bar{a}$  можно определить энергию активации, приходящуюся на 1 кластер или один мономер и имеющую смысл энергии разрыва связи кластера с ассоциатом, то есть начала разрушения полимера.

Среднеинтегральные значения степени ассоциации кластеров исследуемом диапазоне согласно (15) для образца 1, 2, 3 приведены в таблице 12.

Таблица 12 - Энергия активации  $E_a$ , среднеинтегральное значение степени ассоциации кластеров  $\bar{a}$  и отношение  $E/\bar{a}$  для образца 1, 2, 3.

Фракции	$E_a$ , кДж/моль	$\bar{a}$	$E/\bar{a}$ , кДж/моль
Образец 1	9.655	7.13	1.354
Образец 2	6.789	3.70	1.833
Образец 3	10.981	5.85	1.876

Как было показано ранее на других объектах [6-9], во всех случаях удельная энергия активации вязкого течения,  $E/\bar{a}$ , не выходила за пределы энергии сил ван-дер-ваальсового притяжения, 2-20 кДж/моль, как указано авторами работы [10]. Все величины энергии активации фракции образцов 1, 2, 3 приведенные в таблице 11 находятся в нижнем диапазоне энергии ван-дер-ваальсового притяжения молекул, то есть их можно сравнить с полимерными материалами [10], где очень слабые связи образования молекулярных связей, основанны на физическом при-

тяжении мономеров друг к другу без образования фиксированных связей. Будучи наиболее слабыми и ненасыщенными межмолекулярными связями, они преодолеваются в первую очередь, что дает повод авторам [1-2] утверждать о такой природе вязкого течения, которая состоит в разрушении ассоциатов без деструкции кластеров, сохраняющих даже при виртуальном своем существовании энергию связи атомов в твердом состоянии.

**Выводы.** В заключение, кластерно-ассоциативная модель демонстрирует свою жизнеспособность при описании зависящей от температуры динамической вязкости нефтешламов и гидрогенизированных фракций по всему спектру жидкого состояния,

включая экстраполяцию начальной и конечной точек кипения. Это предложенное соотношение вязкости служит начальным приближением, особенно для ситуаций, когда отсутствуют точные экспериментальные данные. Примечательно, что близкое соответствие между кластерно-ассоциативной моделью вязкости и моделью Френкеля в практическом плане подчеркивает их взаимную совместимость и потенциал для того, чтобы эти модели дополняли друг друга. По мере поступления дополнительных экспериментальных данных точность и применимость кластерно-ассоциативной модели могут быть уточнены, что расширит наше понимание поведения вязкости в этих сложных системах.

### Литература

1. Малышев В.П., Нурмагамбетова А.М. Концепция хаотизированных частиц как основа единого отображения твердого, жидкого и газообразного состояний вещества // Вестник Казахского Национального Университета, сер. хим. – 2004. – № 3. – стр. 53-67.
2. Makasheva A.M., Malyshev V.P. Cluster-Associate Model for the Viscosity of Sodium Fluoride in Comparison with the Frenkel Model // Russian Metallurgy (Metally), 2021, V. 2. - pp. 176-180. <https://doi.org/10.1134/S0036029521020154>
3. Tyanakh S., Baikenov M.I., Ma Feng-Yun, Fomin V.N., Baikenova G.G., Ashimhanov A.S., & Seitzhan R.S. (2023) Determination of Optimal Conditions for Catalytic Hydrogenation of Oil Sludge (Atasu-Alashankou).- Eurasian Journal of Chemistry.-Vol.110(2).-pp.139-146 <https://doi.org/10.31489/2959-0663/2-23-15>.
4. Tyanakh S., Baykenov M.I., Tusipkhan A., Aitbekova D.E., Balpanova N.Zh., Ma Fan Yung (2022) // Kinetic study of the thermolysis process of oil sludge (Atasu-Alashankou) with nickel, cobalt and iron deposited on microsilicate. - Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 2 (6 (116), pp.19-24 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255666>.
5. Малышев В.П., Турдукожаева А.М. Уточнение кластерно-ассоциативной модели вязкости расплавов на основе учета влияния температуры на степень ассоциации кластеров // Расплавы. - 2011. - № 6. - стр. 72-79.
6. Малышев В.П. Вероятностно-детерминированное отображение. - Алматы: Ғылым, 1994. - 376 с.
7. Malyshev V.P., Makasheva A.M. Relationship between the cluster theory of liquids and the Frenkel-Andrade viscosity model. Russ Chem Bull. - 2020.- № 69.- pp.1296-1305 <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2901>.
8. Макашева А.М., Бекбаева Л.А. Кластерно-ассоциативная модель вязкости сплава свинец-олово в сопоставлении с моделью Френкеля-Андрате // Вестник КазНУТУ.- 2021. – Т. 143.- № 2. - стр. 134-145. DOI: <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i2.18>
9. Бекбаева Л.А., Малышев В.П., Мамяченков С.В., Макашева А.М. Кластерно-ассоциативная модель вязкости карбоната калия // Комплексное использование минерального сырья.- 2022. - № 2. - стр. 93-98. <https://doi.org/10.31643/2022/6445.22>
10. Сидоров В.И., Устинова Ю.В., Никифорова Т.П. Общая химия. Учеб. для вузов: - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов.- 2014.- 440 с.

### References

1. Malyshev V.P., Nurmagambetova A.M. The concept of chaotic particles as a basis for a unified representation of solid, liquid and gaseous states of matter // Bulletin of the Kazakh National University, ser. Chem. - 2004. -№ 3.- pp.53 - 67.

---

2. Makasheva A.M., Malyshev V.P. Cluster-Associate Model for the Viscosity of Sodium Fluoride in Comparison with the Frenkel Model //Russian Metallurgy (Metally), 2021, V. 2. - pp. 176-180. <https://doi.org/10.1134/S0036029521020154>

3. Tyanakh S., Baikenov M.I., Ma Feng-Yun, Fomin V.N., Baikenova G.G., Ashimhanov A.S., & Seitzhan R.S. (2023) Determination of Optimal Conditions for Catalytic Hydrogenation of Oil Sludge (Atasu-Alashankou).- Eurasian Journal of Chemistry.-Vol.110(2).-pp.139-146 <https://doi.org/10.31489/2959-0663/2-23-15>.

4. Tyanakh S., Baykenov M.I., Tusipkhan A., Aitbekova D.E., Balpanova N.Zh., Ma Fan Yung (2022) // Kinetic study of the thermolysis process of oil sludge (Atasu-Alashankou) with nickel, cobalt and iron deposited on microsilicate. - Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 2 (6 (116), pp.19-24 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255666>.

5. Malyshev V.P., Turdukozhaeva A.M. Refinement of the cluster-association model of melt viscosity based on the effect of temperature on the degree of association of clusters // Melts. - 2011. - № 6. - pp. 72-79.

6. Malyshev V.P. Probabilistic-deterministic mapping. - Almaty: Fylym, 1994. - 376 c.

7. Malyshev V.P., Makasheva A.M. Relationship between the cluster theory of liquids and the Frenkel-Andrade viscosity model. Russ Chem Bull. - 2020.- № 69.- pp.1296-1305

<https://doi.org/10.1007/s11172-020-2901>.

8. Makasheva A.M., Bekbaeva L.A. Cluster-associate model of viscosity of lead-tin alloy in comparison with the Frenkel-Andrade model // Bulletin of KazNITU.- 2021.- Т. 143.- № 2. - pp. 134-145. DOI: <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i2.18>.

9. Bekbaeva L.A., Malyshev V.P., Mamyachenkov S.V., Makasheva A.M. Cluster-associate model of the viscosity of potassium carbonate // Integrated use of mineral raw materials.- 2022. - № 2. - pp. 93-98. <https://doi.org/10.31643/2022/6445.22>.

10. Sidorov V.I., Ustinova Y.V., Nikiforova T.P. General chemistry. Textbook for universities: - M.: Publishing House of the Association of Construction Universities.- 2014.- 440 p.

#### ***Сведения об авторах***

Тянах С. - магистрант, докторант Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан, e-mail: saika\_8989@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5343-4695>.

Байкенов М.И. - профессор, Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан, e-mail: murzabek\_b@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8703-0397>

Ма, Фэн-Юнь - доктор философии, профессор, Синьцзянский университет, Урумчи, КНР, e-mail: ma\_fy@126.com;

Хамитова Т. О. - доктор философии, НЧАО "Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина", Астана, Казахстан, e-mail: khamitova.t@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4691-3732>

Макашева А.М. - доктор технических наук, профессор, Химико-металлургический институт имени Абишева, Караганда, Казахстан, e-mail: astra\_mun@mail.ru;

Малышев В.П. - доктор технических наук, профессор, Химико-металлургический институт имени Абишева, Караганда, Казахстан, e-mail: eia\_hmi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3996-1533>;

Молдабаев А. - старший преподаватель, кандидат химических наук, Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан, e-mail: amirbek.moldabaev@mail.ru.

#### ***Information about authors***

Tyanakh S. - master, doctoral student Karagandy University of the name of academician E.A. Buketov, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: saika\_8989@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5343-4695>;

Baikenov M. I. - professor, Karagandy University of the name of academician E.A. Buketov, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: murzabek\_b@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8703-0397>;

Ma Feng-Yun - PhD, Professor, Xinjiang University, Urumqi, PCR, e-mail: ma\_fy@126.com;

Khamitova T. O. - PhD, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan, e-mail: khamitova.t@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4691-3732>;

Makasheva A. M. - Doctor of Technical Sciences, professor, Abishev Chemical and Metallurgical Institute, , Karaganda, Kazakhsta, e-mail: astra\_mun@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2249-3435>

Malyshev V. P. - Doctor of Technical Sciences, Professor, , Abishev Chemical and Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: eia\_hmi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3996-1533>;

Moldabaev A.- senior lecturer candidate of chemical sciences., Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: amirbek.moldabaev@mail.ru.