

ПРОБЛЕМЫ СОЛЬВАТАЦИИ
И КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ В РАСТВОРАХ

УДК 544.163.2+541.66+644.723

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ С НАНОКЛАСТЕРАМИ: ТЕРМОДИНАМИКА, СВЯЗЬ
С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ И ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬЮ
МОЛЕКУЛ. МАГИЧЕСКИЕ ЧИСЛА, ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ¹

© 2022 г. А. А. Остроушко^{а,*}, Т. В. Терзиян^а, А. П. Ржанникова (Захарова)^а, Л. В. Адамова^а,
К. В. Гржегоржевский^а, М. О. Тонкушина^а

^аУральский федеральный университет (Научно-исследовательский институт физики и прикладной математики),
Екатеринбург, Россия

*e-mail: alexander.ostroushko@urfu.ru

Поступила в редакцию 13.10.2021 г.

После доработки 13.10.2021 г.

Принята к публикации 14.10.2021 г.

Экспериментально изучены энтальпии процесса взаимодействия органических соединений различной химической природы с нанокластерными молибденсодержащими полиоксометаллатами. Были выбраны вещества с диэлектрической проницаемостью, изменяющейся в широком диапазоне значений. Обнаружена знакопеременная зависимость величины энтальпии с переходом от эндотермических к экзотермическим эффектам в области значений диэлектрической проницаемости 15–17. Подобные закономерности, с экстремумом или изломом при значении диэлектрической проницаемости 15–17, были обнаружены для ряда справочных физико-химических параметров (температура кипения и плавления, энтальпии этих процессов, энтальпия образования, вязкость, теплоемкость) широкого перечня органических, а также и некоторых неорганических соединений. Общий характер закономерностей может стать основой для дальнейшего развития современных представлений о механизмах межмолекулярного взаимодействия.

Ключевые слова: физико-химические характеристики веществ, термодинамические свойства, диэлектрическая проницаемость, поляризуемость, сорбция, взаимосвязь свойств, нанокластерные полиоксометаллаты

DOI: 10.31857/S0044453722060176

Изучение процессов взаимодействия нанокластерных полиоксометаллатов [1], например, полиоксомолибдатов (ПОМ) [2–7], с различными веществами представляет интерес в плане возможного использования нанокластеров как основы для создания материалов, используемых в области катализа [2, 8–10], мембранной техники, сенсорики [2, 11]. К наиболее исследованным нанокластерным ПОМ можно отнести соединения со структурой типа кеплерата Mo_{132} [4, 5], $\text{Mo}_{72}\text{Fe}_{30}$ [3], торообразный Mo_{138} [6] и др., которые отличаются с одной стороны по составу, с другой стороны – по строению. При этом исследуются взаимодействия с красителями, лекарственными препаратами, высокомолекулярными матрицами, что позволяет создать фотосенсибилизирующие системы [12], системы адресной и пролонгированной доставки лекарственных веществ с об-

ратной связью [13–15]. Изучение взаимодействия ПОМ с низкомолекулярными соединениями, главным образом органическими, имеет значение для создания новых композиций, используемых, в частности, как мембраны для разделения, очистки и анализа веществ, основанных на различии их физико-химических свойств [16].

С точки зрения изучения взаимодействия ПОМ и органических соединений разных классов получен ряд результатов, давших возможность сделать определенные обобщения [17]. Продуктивным оказалось рассмотрение зависимости физико-химических параметров таких взаимодействий от диэлектрической проницаемости ϵ веществ. Так показано [17], что энтальпия взаимодействия различных соединений (включая и воду, а также и некоторые высокомолекулярные соединения) с ПОМ, такими как Mo_{132} , переходит от положительных значений к отрицательным в области значений $\epsilon = 15–17$. К конкретным веществам, обладающим значениями энтальпии близ-

¹ XIV Международная научная конференция, Иваново, 20–24 сентября 2021 г.

кими к нулевому, относятся, например, такие соединения как *n*-бутанол. Зависимость предельной сорбции паров органических соединений от их ϵ в жидком состоянии имеет излом также в вышеназванном интервале 15–17 (*n*-бутанол, циклогексанол). Для веществ с более высокими значениями ϵ , чем у *n*-бутанола и циклогексанола наблюдали и более крутую зависимость. С другой стороны, четко выраженная корреляция между дипольным моментом молекул, который связывается с диэлектрической проницаемостью уравнением Ланжевена–Дебая, и обсуждаемыми свойствами не была обнаружена. В частности, дипольный момент молекул разных спиртов отличается не сильно, тогда как их диэлектрическая проницаемость, сорбируемость и энтальпия взаимодействия с ПОМ существенно разнятся [17]. При этом зависимость от значения ϵ поляризуемости молекул использованных в наших исследованиях веществ образует достаточно острый максимум в той же области ϵ 15–17. Для оценки поляризуемости [17] были использованы расчеты на основе уравнения Клаузиуса–Моссотти в форме (1). В общем виде можно считать, что эффективная величина поляризуемости учитывает электронную, атомную и ориентационную составляющие [18]. Последняя из составляющих связана с имеющимся у молекул постоянным дипольным моментом. Уравнение Клаузиуса–Моссотти таким образом связывает в данном случае объемную характеристику, диэлектрическую проницаемость, свойственную совокупности молекул, с индивидуальной молекулярной характеристикой – поляризуемостью [18]. Эффективное значение поляризуемости оказывается полезным для описания взаимосвязи физико-химических параметров веществ с их природой. Такая взаимосвязь, по-видимому, в существенной мере коррелирует со способностью к поляризации под действием внешнего электрического поля [18]

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0},$$

где ϵ_r – диэлектрическая проницаемость, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, N – число молекул в единице объема (число молекул в кубическом метре), α – молекулярная поляризуемость (Кл м² В⁻¹).

Максимальным значением ϵ среди изученных в работе [17] веществ обладала вода, на зависимости энтальпии взаимодействия с ПОМ для области ее ϵ наблюдалась довольно пологая нисходящая ветвь. Представляется интересным понять, как идет дальнейшая зависимость с учетом существования соединений, имеющих существенно более высокие значения ϵ [16] в жидком состоянии.

Установление взаимосвязи между дипольным моментом, поляризуемостью, диэлектрической проницаемостью, характером межмолекулярных взаимодействий и физико-химическими характеристиками органических соединений (температура кипения, теплота испарения, плотность) имеет практическое значение, в частности в области разделения веществ [11]. Ряд работ посвящен рассмотрению вопросов определяющего влияния на указанные характеристики специфических и неспецифических взаимодействий [19–25], обнаружению признаков групповых зависимостей для конкретных классов соединений (углеводороды, спирты, органические кислоты и т.д.). Корни таких исследований уходят достаточно глубоко к истокам становления физикохимии жидкостей. Например, в публикациях начала и середины прошлого века, в том числе в работах Кирквуда [26, 27], обсуждался так называемый неконтигуальный и континуальный подход к описанию межмолекулярных взаимодействий и свойств веществ, когда рассматривались диэлектрические взаимодействия между собой отдельных близлежащих молекул или поведение молекул в среде, обладающей определенным значением ϵ . Можно предположить, что существование наблюдаемых экстремумов, изломов или перегибов на зависимости рассматриваемых нами свойств [17] связано с переходом от одних механизмов межмолекулярного взаимодействия к другим. Представляется в этом плане интересным сопоставление различных физико-химических характеристик, связанных с молекулярными свойствами, для большего числа веществ с использованием, в частности, сведений, имеющихся в базах данных [16].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения ПОМ использовали хорошо отработанные и зарекомендовавшие себя методики [3–7]. В качестве исходных реагентов при синтезе и очистке ПОМ, а также веществ для изучения взаимодействия с ПОМ при комнатной температуре использовали следующие: гептамолибдат аммония (NH₄)₆Mo₇O₂₄ · 4H₂O квалификации “х.ч.”, ацетат аммония NH₄(CH₃COO) квалификации “х.ч.”, гидразин сернокислый N₂H₄ · H₂SO₄ квалификации “ч.д.а.”, уксусная кислота ледяная CH₃COOH (ГОСТ 61-75), этиловый спирт медицинский C₂H₅OH 95%, хлорид железа (III) шестиводный FeCl₃ · 6H₂O Panreac (содержание основного вещества 97–102%), ацетат натрия Na(CH₃COO) · 3H₂O квалификации “ч.д.а.”, соляная кислота HCl квалификации “ос.ч.”, хлорид натрия NaCl квалификации “ч.д.а.”, диэтиловый эфир квалификация “х.ч.”; вода дистиллированная H₂O, метанол CH₃OH

квалификация “х.ч.”, этанол C_2H_5OH квалификация “х.ч.”, *трет*-бутанол $(CH_3)_3COH$ квалификация “ч.д.а.”, четырёххлористый углерод CCl_4 квалификация “ч.д.а.”, диметилформаимид C_3H_7NO квалификация “х.ч.”, *н*-бутанол и *трет*-бутанол C_4H_9OH квалификация “ч.д.а.”. Высокодиелектричными средами для исследований при температуре, соответствующей их жидкому состоянию, служили *N*-метилформаимид 99% C_2H_5NO , квалификация “х.ч.”, *N*-метилацетаимид $CH_3CONHCH_3$ квалификация “х.ч.”.

Экспериментальные данные по измерению энтальпии смешения нанокластерных полиоксомолибдатов с растворителями, имеющими различные значения диэлектрической проницаемости, были получены методом изотермической калориметрии с использованием микрокалориметра типа Тиана–Кальве. Для этого в стеклянную калориметрическую ампулу помещали навеску ПОМ ≈ 0.05 г, ампулу запаивали и помещали в калориметрическую камеру, содержащую ≈ 5 мл растворителя. В процессе калориметрического опыта ампулу разбивали внутри камеры и регистрировали тепловой эффект процесса. Эксперименты проводили при комнатной температуре за исключением измерений для *N*-метилацетаида, осуществленных при $30^\circ C$ ввиду его более высокой температуры плавления. Абсолютная погрешность калориметрических измерений, по данным электрической калибровки прибора, составляла ± 0.02 Дж.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Учитывая результаты исследований [17], был сделан прогноз перспективности рассмотрения взаимосвязи универсальных физико-химических характеристик веществ с их диэлектрической проницаемостью. Поэтому на первом этапе данных исследований был проведен анализ и сопоставление между собой зависимости физико-химических параметров веществ, описанных нами в работе [17] безотносительно к их взаимодействию с ПОМ. К анализируемым параметрам [17] (рис. 1) мы отнесли температуру кипения и плавления, энтальпию испарения и плавления, теплоемкость, динамическую вязкость, т.е. те свойства, которые в существенной мере определяются межмолекулярными взаимодействиями. Учитывая положительный опыт сопоставления физико-химических характеристик в плане их зависимости от значения ϵ соединений [17], в данном случае были также построены аналогичные графики, куда были добавлены данные по *N*-метилформаимиду и *N*-метилацетаимиду (точки справа) и некоторые другие справочные сведения [16]. Были использованы табличные значения диэлектрической проницаемости веществ в жидком состоянии. Из полу-

ченных зависимостей видно, что в регионе (области) значений ϵ 15–17 для большей части свойств наблюдаются экстремумы, как и у кривой для поляризуемости [17], или изломы (энтальпия плавления, теплоемкость в расчете на единицу массы). Это подтверждает существование своего рода переходного “магического числа” (значения ϵ) в области 15–17. Далее зависимости свойств чаще всего проходят минимум и становятся более плавными для высокодиелектрических веществ. В некоторых случаях (температура плавления) имеются признаки существования определенных групп соединений со сходным типом кривых. Представление данных зависимости физико-химических характеристик в расчете на единицу массы или на 1 моль вещества изменяет ход зависимости, как например, для теплоемкости (рис. 1), что в целом понятно. Однако, при этом тем не менее происходит изменение характера кривых именно в регионе “магического числа”.

Полученные в настоящей работе данные по энтальпии взаимодействия органических соединений и воды с полиоксометаллатами (рис. 2) хорошо коррелируют с имевшимися ранее результатами [17]. Для соединений, обладающих относительно невысокими значениями ϵ , имеется переход энтальпии через нулевую отметку. Близкие по виду зависимости наблюдали (рис. 2) для разных ПОМ, в том числе кеплератного и торообразного строения, что свидетельствует о наличии общих закономерностей для них. Наблюдаемый вид зависимостей физико-химических характеристик дал основания для дальнейших прогнозов. В частности, ориентируясь на данные рис. 1, можно было предположить, что взаимодействие ПОМ с *N*-метилформаимидом и *N*-метилацетаимидом, обладающими высокой диэлектрической проницаемостью, должно быть менее энергетически выгодным, чем у воды. Это подтвердилось в ходе экспериментов (рис. 2). По-видимому, для молекул этих веществ, у которых имеются молекулярные группировки, несущие локальные положительные и отрицательные заряды, является более выгодной самоассоциация с образованием связей типа пептидных. При этом следует учесть, что указанные соединения имеют большой дипольный момент, значение которого, вероятно, в области высокодиелектрических соединений оказывает существенное влияние на физико-химические свойства. Для прогноза характеристик взаимодействия различных веществ с ПОМ разного состава и строения могут быть использованы полученные нами на примере метанола данные о взаимоотношении величин энтальпии взаимодействия и предельной сорбируемости (рис. 3). Данные о величине последней отражены в работах [28, 29]. В целом имеется хотя и нелинейная, но прямая корреляция между величиной предельной сорбции веществ на ПОМ и энталь-

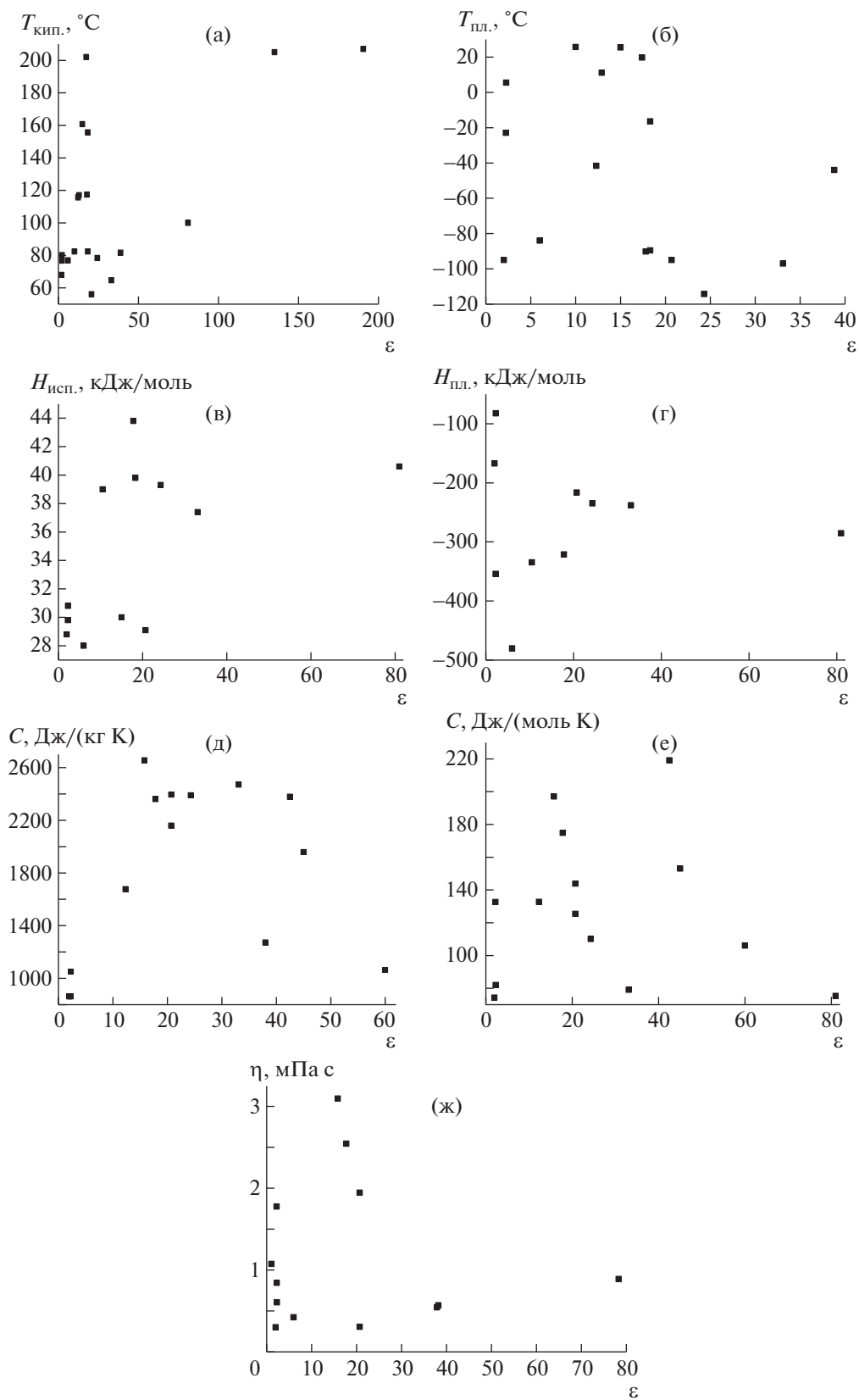


Рис. 1. Зависимости физико-химических свойств от диэлектрической проницаемости: а – температура кипения ($^\circ\text{C}$), б – температура плавления ($^\circ\text{C}$), в – энтальпия испарения (кДж/моль), г – энтальпия плавления (кДж/моль), д – теплоемкость (Дж/(кг К)), е – теплоемкость (Дж/(моль К)), ж – динамическая вязкость (мПа с).

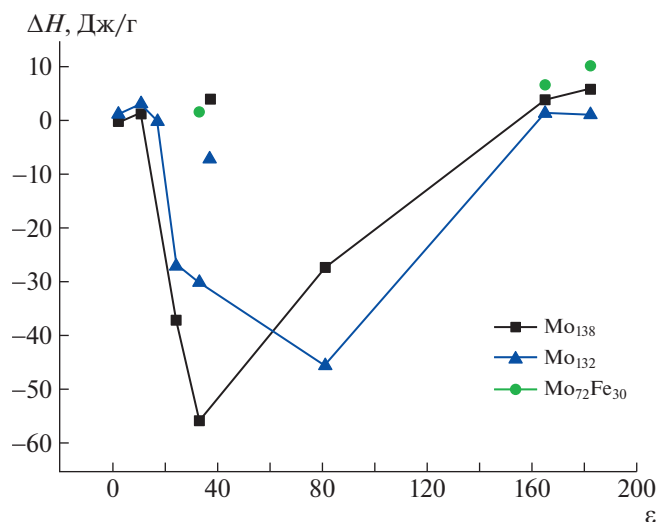


Рис. 2. Энтальпия взаимодействия (Дж/г композиции) ПОМ с веществами в зависимости от их диэлектрической проницаемости. Данные приведены (по возрастанию диэлектрической проницаемости) для тетрахлорметана, *трет*-бутанола, *н*-бутанола, этанола, диметилформамида, воды, *N*-метилацетамида, *N*-метилформамида.

пией их взаимодействия [17]. Это позволяет прогнозировать по результатам измерения тепловых эффектов смещения (энтальпии) [30], формальную сорбируемость на ПОМ соединений, которые не обладают достаточно высоким давлением паров в условиях экспериментов по сорбции из газовой среды. Данный момент может иметь практическое приложение для создания мембранных систем разделения, очистки и анализа жидких продуктов.

Анализ характеристик более широкого круга соединений из базы данных [16] относительно значений ϵ в жидком состоянии также демонстрирует наличие экстремальных зависимостей, сходных между собой для групп веществ, образующих несколько аналогичных кривых (рис. 4). Здесь в рассмотрение включена и энтальпия образования соединений в жидкой форме, величина которой, по-видимому, существенным образом связана собственно с возникновением жидкой фазы получаемых веществ и формированием в ней межмолекулярных связей. Для веществ с низкими значениями ϵ в начальной части графиков наблюдается большое различие физико-химических свойств, которое связано с различием природы веществ, их молекулярной массы и прочих особенностей. Далее происходит более четко различимая дифференциация по группам. В области высокодиэлектрических веществ (в рассмотрение включены и некоторые неорганические соединения [16]) также видна более плавная зависимость свойств, которую мы отмечаем ра-

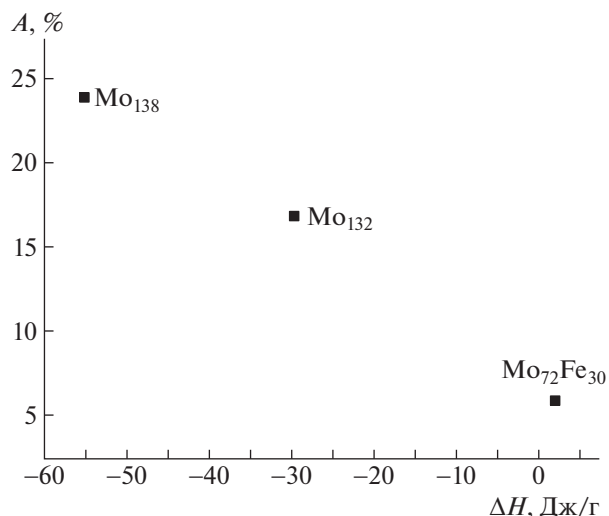


Рис. 3. Связь предельной сорбируемости (мас. %) метанола с энтальпией (Дж/г композиции) его взаимодействия с полиоксометаллатами.

нее. Следует обратить внимание также на наличие максимума поляризуемости, наблюдаемого при рассмотрении широкого круга органических веществ. Такой экстремум имеется именно в области значений ϵ , обозначенной нами выше как “магическое число”. Вид зависимости поляризуемости от ϵ обладает сходством с такими зависимостями для других физико-химических характеристик веществ (рис. 4), связанных с диэлектрической проницаемостью.

На данный момент затруднительно сделать окончательные выводы относительно всех групп соединений, демонстрирующих на зависимостях физико-химических свойств от ϵ сходные по виду кривые, учитывая большое количество разнообразных веществ и необходимость тщательного анализа имеющихся по ним данных. Помимо прочего при таком рассмотрении нужна и критическая оценка имеющихся табличных данных с точки зрения опечаток и других ошибок. Тем не менее, некоторые закономерности обнаружить можно. Если обратиться, например, к зависимости для температуры кипения [16], можно увидеть следующее. Нижняя на графике (рис. 4) ветвь групповой зависимости в области значений ϵ 50–150 образована по возрастанию ϵ цианоацетиленом, циановодородом и фтороводородом. Выше (в области ϵ 25–125) лежит группа точек для этаннитрила, ацетонитрила, гидразина. Близки к этой групповой зависимости данные для метанола (сходны с этаннитрилом), воды (нисходящая часть) и хлорной кислоты. Еще выше (интервал ϵ 2–200) находятся точки, относящиеся к диметилформамиду, диметилацетамиду (ДМАА), фурфуролу (близки к ДММА), а далее – ацетамиду, этанамиду, этиленкарбонату и по нисходящей –

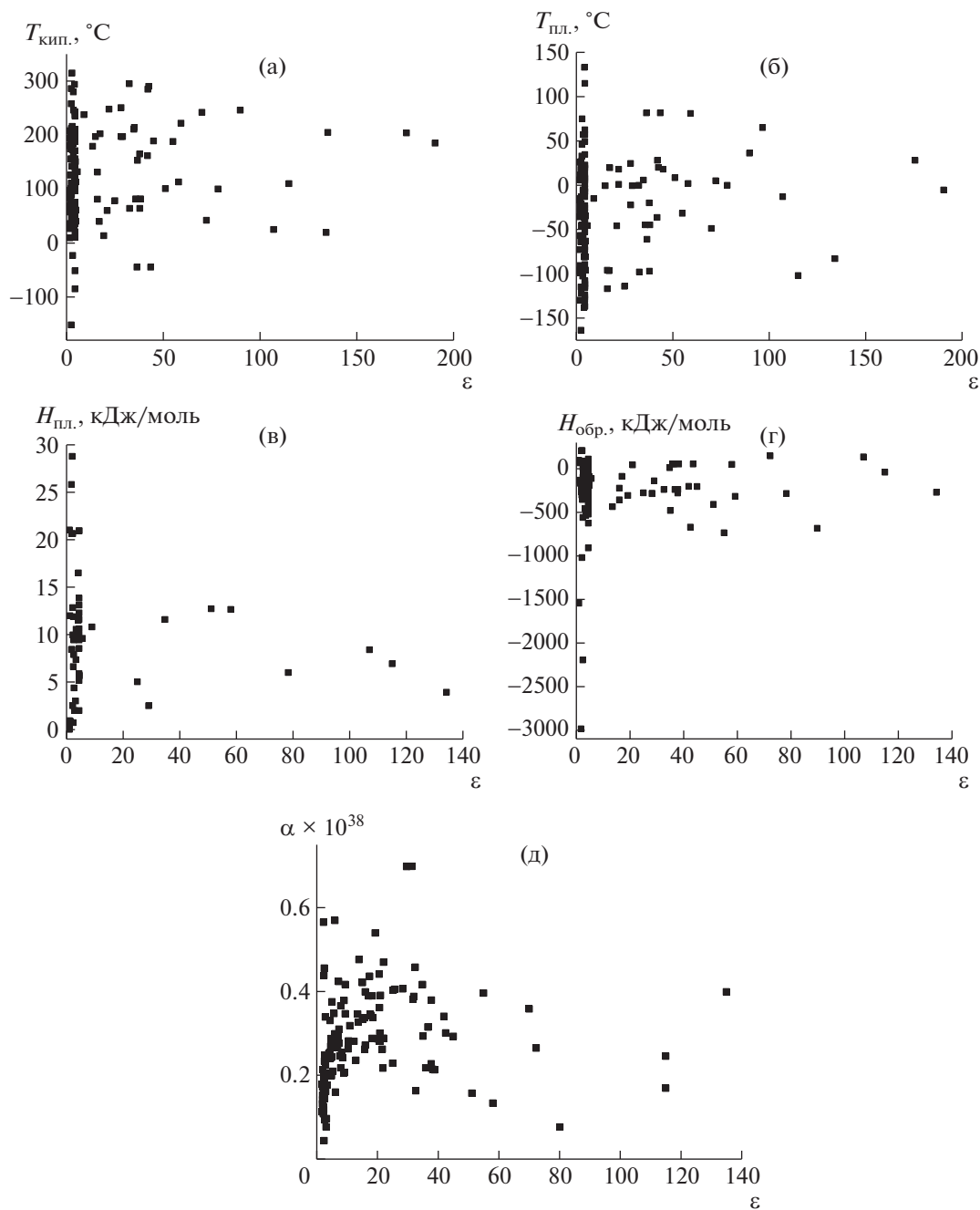


Рис. 4. Зависимости физико-химических свойств большой группы веществ от диэлектрической проницаемости: а – температура кипения ($^\circ\text{C}$), б – температура плавления ($^\circ\text{C}$), в – ΔH энтальпия плавления (кДж/моль), г – ΔH энтальпия образования (кДж/моль), д – поляризуемость ($\text{Кл м}^2/\text{В}$).

этилацетамиду, N-метилацетамиду, N-метилметанамиду. На зависимости энтальпии образования верхняя группа точек в интервале ϵ 20–140 относится, в частности, к бензоилхлориду, а также нитробензолу и этаннитрилу (близки), далее – к ацетонитрилу, цианоацетилену, циановодороду, а замыкают группу нисходящие точки для хлорной кислоты и фтороводорода. Для энтальпии плавления (рис. 4) верхняя группа точек от-

носится соответственно (справа налево) к фтороводороду, хлорной кислоте, циановодороду, а далее следуют гидразин, нитробензол. Похожие ряды точек для групп веществ можно обнаружить и для других свойств, включая зависимость поляризуемости от ϵ . Следует полагать, что в некоторых случаях точки на графиках для отдельных веществ близки к точкам групповых зависимостей из-за совпадения сочетающихся свойств (напри-

мер, метанол и этаннитрил, диметилацетамид и фурфурол). Однако с другой стороны можно видеть, что для определенных групп веществ, таких как азотсодержащие соединения, в частности амиды, или молекул, образующих кислоты, прослеживается групповая зависимость. Проведение более подробного анализа таких зависимостей интересно продолжить в дальнейшем. Стоит отметить, что более плавные, чем в области ϵ 15–17, максимумы на групповых зависимостях можно обнаружить в области ϵ примерно от 60 до 100 (рис. 4). Наличие групповых зависимостей может быть связано с тем, что каждый вид молекулярных фрагментов вносит определенный вклад в аддитивные электрические, механические и другие характеристики веществ, что хорошо прослеживается на примере органических полимеров [31].

Помимо прочего, стоит отметить практическое значение обнаруженного вида зависимости физико-химических свойств и “магического” интервала ϵ 15–17, в частности, для хроматографических процессов. В указанной области наблюдается смена характера зависимости (угла наклона) [17] растворяющей способности веществ по Гильдебранду [32] и Хансену [33], индекса полярности по Снайдеру [34].

Таким образом, установлен общий характер зависимости физико-химических свойств веществ (температура кипения, плавления, энтальпия этих процессов, энтальпия образования соединений, теплоемкость, вязкость) от диэлектрической проницаемости соответствующих жидких сред. В качестве удобной первичной модели для установления закономерностей в указанных зависимостях послужило взаимодействие различных соединений с нанокластерными полиоксометаллатами (ПОМ). Обнаружена область значений диэлектрической проницаемости $\epsilon = 15-17$, где происходит достаточно резкое изменение характера зависимости физико-химических характеристик от ϵ , своего рода “магическое число”, в принципе совпадающее с максимумом полярности веществ, полученной по уравнениям типа Клаузиуса–Моссотти. В регионе высоких значений ϵ после локального минимума можно отметить наличие более плавных зависимостей физико-химических свойств. Помимо этого, для рассмотренных в работе физико-химических характеристик наблюдаются близкие по виду групповые зависимости от диэлектрической проницаемости. Так, в частности, прослеживается групповая зависимость от диэлектрической проницаемости для температуры кипения и энтальпии образования группы амидных, а также группы веществ, образующих кислоты. При указанном выше плавном изменении физико-химических свойств в области высоких значений ϵ можно тем не менее отметить наличие максимумов, приходящихся на регион диэлектрической проницаемо-

сти от 60 до 100. Полученные в ходе исследований данные могут иметь практическое значение для прогнозирования свойств веществ, разработки методов их разделения и анализа, например, хроматографических. Результаты исследований могут послужить для дальнейшей научной дискуссии и обсуждения рассмотренной в работе проблематики, они указывают на перспективность использованного подхода к рассмотрению взаимосвязи свойств низкомолекулярных соединений.

Исследования выполнены при финансовой поддержке по госзаданию Министерства науки и высшего образования РФ – проект АААА-А20-120061990010-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pope M. T. Heteropoly and Isopoly Oxometallates. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 180 p.
2. Müller A., Gouzerh P. // Chem. Soc. Rev. 2012. V. 41. № 22. P. 7431. <https://doi.org/10.1039/C2CS35169B>
3. Müller A., Sarkar S., Shah S.Q.N. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 1999. V. 38. P. 3238. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3773\(19991102\)38:21<3238::AID-ANIE3238>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3773(19991102)38:21<3238::AID-ANIE3238>3.0.CO;2-6)
4. Müller A., Krickemeyer E., Bögge H. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 1998. V. 37. № 24. P. 3360. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3773\(19981231\)37:24<3359::AID-ANIE3359>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3773(19981231)37:24<3359::AID-ANIE3359>3.0.CO;2-J)
5. Müller A., Fedin V.P., Kuhlmann C. et al. // Chem. Commun. 1999. № 10. P. 927. <https://doi.org/10.1039/A809856E>
6. Müller A., Maiti R., Schmidtman M. et al. // Chem. Commun. 2001. № 20. P. 2126. <https://doi.org/10.1039/B106092A>
7. Liu T., Diemann E., Müller A. // J. Chem. Educ. 2007. V. 84. P. 526. <https://doi.org/10.1021/ed084p526>
8. Mokhtari R., Rezaeifard A., Jafarpour M., Farrokhi A. // Catalysis Science & Technology. 2018. V. 8. I. 18. P. 4645. <https://doi.org/10.1039/c8cy00603b>
9. Garazhian Z., Rezaeifard A., Jafarpour M. // RSC Advances. 2019. V. 9. I. 60. P. 34854. <https://doi.org/10.1039/c9ra06581d>
10. Menshikov S.Yu., Belozeroва K.A., Ostroushko A.A. // Physical and Chemical Aspects of the Study of Clusters, Nanostructures and Nanomaterials. 2020. V. 12. P. 853. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2020.12.853>
11. Popa A.M., Hu L., Crespy D. et al. // J. of Membrane Sci. 2011. V. 373. № 1–2. P. 196. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.03.015>
12. Fazylova V., Shevtsev N., Mikhailov S. et al. // Chemistry – A European Journal. 2020. 26. 25. P. 5685. <https://doi.org/10.1002/chem.201905781>
13. Grzhegorzhevskii K.V., Shevtsev N.S., Abushaeva A.R. et al. // Russ Chem Bull. 2020. 69. P. 804. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2836-1>

14. *Ostroushko A.A., Grzhegorzhevskii K.V., Medvedeva S.Yu. et al.* // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2021. V. 12. № 1. P. 81. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2021-12-1-81-112>
15. *Ostroushko A.A., Gagarin I.D., Danilova I.G., Gette I.F.* *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2019. 10 (3). P. 318. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2019-10-3-318-349>
16. <http://www.chemister.ru/Database/Tables/dielectric.php>.
17. *Grzhegorzhevskii K., Adamova L., Ostroushko A.* // *Dalton Transactions*. V. 50. № 7. P. 2403. (With Electronic Supplementary Material) <https://doi.org/10.1039/D0DT04067C>
18. *Ozerov R.P., Vorobyev A.A.* *Dielectric Properties of Substances (In Physics for Chemists)*. V.C. Elsevier, 2007. Ch. 4. P. 251. <https://doi.org/10.1016/B978-044452830-8/50006-4>
19. *Nikolaev V.F., Ismagilova G.I., Sultanova R.B.* // *Вестн. КГЭУ*. 2010. V. 1. № 4. P. 48. <https://cyberleninka.ru/article/n/contributions-of-intermolecular-interactions-to-normal-boiling-point-of-pure-molecular-liquids>.
20. *Гапунов М.Г.* // *Вестн. Казанского технологического университета*. 2012. V. 15. № 11. P. 74. <https://cyberleninka.ru/article/n/zavisimost-temperature-kipeniya-uglevodorodov-ot-sil-mezhmolekulyarnogo-vzaimodeystviya>.
21. *Николаев В.Ф., Исмагилова Г.И.* // Там же. 2010. № 5. P. 36. <https://cyberleninka.ru/article/n/normalnye-temperature-kipeniya-individualnyh-zhidkostey-vklady-universalnyh-i-spetsificheskikh-vzaimodeystviy>.
22. *Nikolaev V.F., Ismagilova G.I.* // *Physics and Chemistry of Liquids*. 2011. 49 (4). P. 470. <https://doi.org/10.1080/00319101003646561>
23. *Гапунов М.Г.* // *Вестн. Казанского технологического университета*. 2012. V. 15. № 11. P. 74. <https://cyberleninka.ru/article/n/zavisimost-temperature-kipeniya-uglevodorodov-ot-sil-mezhmolekulyarnogo-vzaimodeystviya>.
24. *Гапунов М.Г.* // Там же. 2013. V. 16. № 12. P. 18. <https://cyberleninka.ru/article/n/zavisimost-teploty-ispareniya-uglevodorodov-ot-sil-mezhmolekulyarnogo-vzaimodeystviya>.
25. *Гапунов М.Г., Гапунов В.М.* // Там же. 2014. V. 17. № 3. P. 260. <https://cyberleninka.ru/article/n/zavisimost-plotnosti-zhidkih-uglevodorodov-ot-sil-mezhmolekulyarnogo-v-zaimodeystviya>.
26. *Kirkwood J.K.* // *J. Chem. Phys.* 1936. V. 4. P. 592. <https://doi.org/10.1063/1.1749911>
27. *Kirkwood J.K.* // *Ibid.* 1939. V. 7. P. 911. <https://doi.org/10.1063/1.1750343>
28. *Ostroushko A.A., Adamova L.V., Grzhegorzhevskii K.V. et al.* // *Russ. J. Phys. Chem.* 2020. V. 94. № 4. P. 762. <https://doi.org/10.1134/S0036024420040159>
29. *Ostroushko A.A., Adamova L.V., Grzhegorzhevskii K.V. et al.* // *Ibid.* 2020. V. 94. № 12. P. 2622. <https://doi.org/10.1134/S0036024420120237>
30. *Ostroushko A.A., Adamova L.V., Eremina E.V. et al.* // *Ibid.* 2015. V. 89. № P. 1439. <https://doi.org/10.1134/S0036024415080245>
31. *Лушейкин Г.А., Тюрина С.А.* // *Пластические массы*. 2021. № 7–8. С. 39. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-3-4-27-31>
32. *Hildebrand J.H., Scott R.L.* *Solubility of nonelectrolytes*. New York: Dover Publ., 1964. 3rd edn. 488 p.
33. *Snyder L.R.* // *J. Chromatogr. A*. 1974. V. 92. № 2. P. 223. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)85732-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)85732-5)
34. *Hansen C.M.* *Hansen solubility parameters: a user's handbook*. CRC press, 2007. 544 p.