

07,11,12

## Эффект четности — симметрии молекул n-алканов

© А.К. Борисов, В.А. Марихин, В.М. Егоров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: borisov.ak@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 7 марта 2024 г.

В окончательной редакции 7 марта 2024 г.

Принята к публикации 27 марта 2024 г.

Исследованы особенности фазовых переходов в гомологическом ряду нормальных алканов разной четности. Получены истинные значения термодинамических параметров в результате устранения методических погрешностей дифференциальной сканирующей калориметрии. Выявлено проявление эффекта четности в гомологическом ряду n-алканов как в поведении термодинамических параметров фазовых переходов, так и в процессе структурного перестроения кристаллографической упаковки при твердофазном переходе, обусловленного различной симметрией молекул n-алканов.

**Ключевые слова:** n-алканы, молекулярные кристаллы, молекулярная упаковка, симметрия, фазовые переходы, дифференциальная сканирующая калориметрия, эффект четности.

DOI: 10.61011/FTT.2024.05.58081.46

### 1. Введение

Одним из перспективных направлений развития „зеленой энергетики“ является разработка нового способа преобразования, транспортировки и хранения энергии за счет использования материалов с изменяющейся фазой (Phase Change Materials, PCM). Широкое использование PCM позволяет частично отказаться от источников тепла, требующих для своей работы ограниченных энерго-ресурсов, поскольку PCM могут преобразовать (накапливать, хранить и выделять) потоки тепловой энергии от различных источников за счет собственных тепловых эффектов в результате фазовых переходов. Одними из наиболее перспективных материалов, применяемых в качестве PCM, являются длинноцепочечные молекулярные кристаллы n-алканов в силу их высокой энерго-эффективности, гибкости термодинамических свойств и доступности [1–3]. Применение n-алканов, а также их смесей в качестве PCM позволяет создавать комфортные условия жизнедеятельности людей в температурной области от  $-40$  до  $70^\circ\text{C}$ . С другой стороны, монодисперсные n-алканы являются удобными модельными объектами для выявления природы фазовых переходов и установления закономерностей „структура–свойство“ в силу отсутствия структурных и конформационных дефектов.

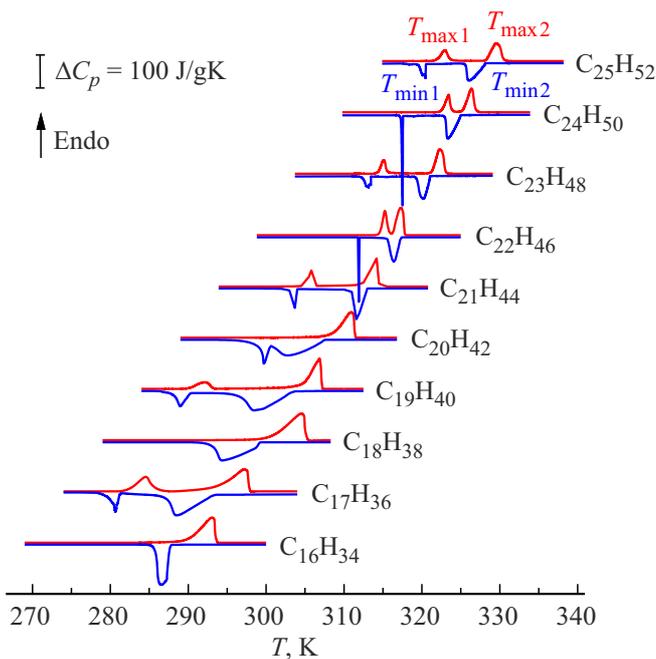
В предыдущих наших работах [4,5] проводились исследования термодинамических свойств некоторых n-алканов и были замечены их зависимости от четности числа атомов углерода в цепи. В данной работе для выявления надежных зависимостей свойств от четности и установления причин их появления исследуется широкий гомологический ряд n-алканов при варьировании длины цепи (гексадекан  $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ , гептадекан  $\text{C}_{17}\text{H}_{36}$ , октадекан  $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ , нонадекан  $\text{C}_{19}\text{H}_{40}$ , эйкозан  $\text{C}_{20}\text{H}_{42}$ ,

генэйкозан  $\text{C}_{21}\text{H}_{44}$ , докозан  $\text{C}_{22}\text{H}_{46}$ , трикозан  $\text{C}_{23}\text{H}_{48}$ , тетракозан  $\text{C}_{24}\text{H}_{50}$  и пентакозан  $\text{C}_{25}\text{H}_{52}$ ), имеющих температуры фазовых переходов в наиболее актуальном для практического применения температурном диапазоне:  $\Delta T \approx 10\text{--}50^\circ\text{C}$ . Таким образом, рассмотрение данного гомологического ряда позволяет решить кроме фундаментальных задач, связанных с исследованием кинетики фазовых переходов в n-алканах, практические, связанные с выяснением эффективности применения n-алканов как PCM-материалов.

### 2. Результаты и обсуждение

Исследования проводились методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при использовании калориметров типа „ДСК 500 „Спецприбор“, Россия (для  $\text{C}_{16}\text{H}_{34}\text{--}\text{C}_{20}\text{H}_{42}$ ) и „Seiko DSC 6100“, Япония (для  $\text{C}_{21}\text{H}_{44}\text{--}\text{C}_{25}\text{H}_{52}$ ) в атмосфере азота. Скорости сканирования варьировались в широком интервале от 0.25 до 25 K/min. Для уменьшения методических погрешностей минимизировалось термосопротивление образцов и калориметрических капсул путем использования малой массы образцов (1–3 mg) и калориметрических капсул (16 mg). В качестве образцов выбраны монодисперсные порошки n-алканов фирмы „Sigma“, высокой степени чистоты 99.5%.

Температурные зависимости теплоемкости в циклах нагревание–охлаждение были получены методом ДСК для каждого из образцов гомологического ряда при вариации скоростей сканирования. На рис. 1 представлены термограммы, полученные при скорости 1 K/min. Как видно из рисунка, для большинства n-алканов наблюдается по два пика при нагревании и охлаждении, что свидетельствует о двухстадийном протекании перехода



**Рис. 1.** Кривые ДСК нагревания (красные линии) и охлаждения (синие линии) гомологического ряда n-алканов со скоростью 1 K/min.

из кристаллического состояния в расплав и обратно. Однако, для образцов с четным числом атомов углерода в цепи, по мере уменьшения их числа наблюдается слияние двух пиков теплоемкости в один. В связи с этим, можно предположить, что пики плавления и кристаллизации коротких четных n-алканов объединяют в себе обе стадии фазового превращения, что приводит к искажению формы пиков. Для нечетных n-алканов всех длин цепей наблюдается по два пика при нагревании и охлаждении, что позволяет предполагать разные механизмы перестроения молекулярной структуры при фазовом превращении твердое тело—расплав у n-алканов с четной и нечетной длиной цепи.

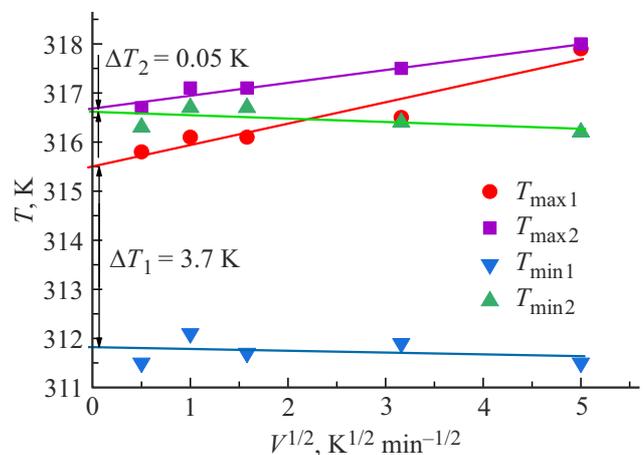
Ранее для n-алканов было показано [6–8], что низкотемпературный эндотермический пик  $T_{\max 1}$  связан со структурным фазовым переходом, осуществляющимся в твердой фазе, а высокотемпературный  $T_{\max 2}$  с переходом порядок—беспорядок, сопровождающимся плавлением. При охлаждении образца из расплава, экзотермическому пику  $T_{\min 2}$  соответствует кристаллизация образца, а  $T_{\min 1}$  — структурный твердофазный переход. Как видно из рис. 1, для обоих фазовых переходов наблюдается эффект температурного гистерезиса, т.е. несовпадение температур фазовых переходов (ФП) при нагревании и охлаждении. Такой гистерезисный эффект может быть вызван как физическими причинами, так и методическими, связанными с особенностями метода ДСК [9]. Чтобы выяснить природу гистерезиса, для всех исследуемых n-алканов использовался специальный метод [10], позволяющий устранить методическую погрешность при

получении серии термограмм с широкой вариацией скоростей сканирования на идентичных образцах или одних и тех же при условии обратимости ФП.

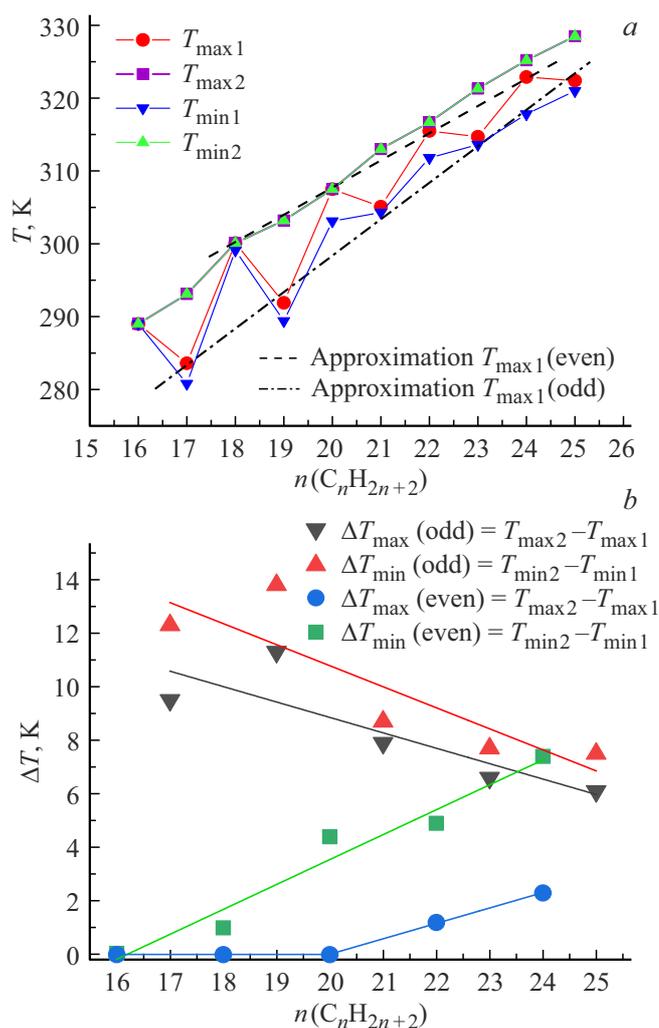
На рис. 2 приведен пример использования данного метода для докозана  $C_{22}H_{46}$ . На основании экспериментальных данных строятся зависимости  $T_{\max, \min} = f(V^{1/2})$ , которые при отсутствии структурных изменений в образце должны быть линейными. Экстраполяция этих зависимостей к нулевой скорости сканирования позволяет получить методически неискаженные значения температур ФП. Как видно из рисунка, при экстраполяции к нулевой скорости сканирования температуры плавления  $T_{\max 2}$  и кристаллизации  $T_{\min 2}$  с учетом погрешности совпали  $\Delta T_2 \approx 0$  K, тогда как температуры твердофазного перехода при нагревании  $T_{\max 1}$  и охлаждении  $T_{\min 1}$  отличаются и при нулевой скорости на  $\Delta T_1 \approx 3.7$  K, т.е. наблюдается истинный температурный гистерезис.

Отсюда можно заключить, что появление эффекта гистерезиса у вторых максимумов ( $T_{\max 2}$ ,  $T_{\min 2}$ ) только на ДСК термограммах связано с методическими причинами, тогда как наличие истинного гистерезиса у первых максимумов ( $T_{\max 1}$ ,  $T_{\min 1}$ ) обусловлено физическими причинами. Таким образом, наличие истинного температурного гистерезиса позволяет отнести твердофазный переход к фазовым переходам первого рода (ФП-1), тогда как переход плавление—кристаллизация в n-алканах по отсутствию гистерезиса и форме пика теплоемкости можно отнести к фазовым переходам второго рода (ФП-2), аналогично [9] для 1,22-докозандиола. Важно отметить, что благодаря методу экстраполяции, удается определить истинные температуры фазовых переходов.

Значения температур фазовых переходов, полученные вышеописанным методом для всех n-алканов, представлены на рис. 3, а. Температуры ФП-2 при нагревании ( $T_{\max 2}$ ) и охлаждении ( $T_{\min 2}$ ) совпадают, вследствие отсутствия температурного гистерезиса, и монотонно возрастают с увеличением n-числа атомов углерода



**Рис. 2.** Метод нахождения истинных температур ФП для докозана ( $C_{22}H_{46}$ ).



**Рис. 3.** Истинные температуры ФП гомологического ряда  $n$ -алканов  $C_nH_{2n+2}$  (a) и зависимости температурных интервалов между ФП-1 и ФП-2 при нагревании и охлаждении от длины цепи (b).

в цепи  $n$ -алкана, тогда как температуры максимумов ФП-1 ( $T_{\max 1}$  и  $T_{\min 1}$ ) демонстрируют „пилообразные“ зависимости от четности  $n$ . Причину данного эффекта связывают с различной симметрией молекул (транс и цис) четных и нечетных  $n$ -алканов и, соответственно, с их различной укладкой в основные и субъядейки в зависимости от симметрии.

Влияние четности  $n$ -алкана на температуры фазовых превращений отмечали в работах [11,12], нами также было отмечено влияние четности и на кинетику протекания ФП-1 [13]. Явление зависимости термодинамических параметров от четности длины цепи  $n$ -алкана получило название эффекта четности и объясняется различной кристаллографической упаковкой четных (транс) и нечетных (цис) молекул  $n$ -алканов в основные и субъядейки.

При более детальных исследованиях, оказалось, что не только температуры ФП, но и интервалы меж-

ду ФП при нагревании ( $\Delta T_{\max} = T_{\max 2} - T_{\max 1}$ ) и при охлаждении ( $\Delta T_{\min} = T_{\min 2} - T_{\min 1}$ ) также существенно различаются в четных и нечетных  $n$ -алканах. Из рис. 3, b следует, что в нечетных  $n$ -алканах  $\Delta T_{\max}$  и  $\Delta T_{\min}$  в несколько раз больше, чем в четных. Кроме этого,  $\Delta T_{\max}(n)$  и  $\Delta T_{\min}(n)$  демонстрируют противоположный характер зависимостей с ростом  $n$ , в четных  $n$ -алканах  $\Delta T_{\max}(n)$  и  $\Delta T_{\min}(n)$  возрастают, тогда как в нечетных — наоборот, спадают. При этом, однако, температуры ФП-2 не зависят от четности  $n$  и монотонно возрастают по установленной ранее зависимости [14], которую на рассматриваемом участке длин цепей можно приближенно считать линейной, что также следует из рис. 3, a.

Таким образом, различия в зависимостях  $\Delta T_{\max}$  и  $\Delta T_{\min}$   $n$ -алканов разной четности определяются только положением ФП-1, при котором, как известно [8,15,16], в  $C_{16}H_{34} - C_{25}H_{52}$  происходит твердофазный структурный переход из исходной субъядейки в промежуточную ротационную фазу, обусловленный увеличением межмолекулярных расстояний за счет теплового расширения, ослаблением Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий и возникновением вращения молекул вокруг их главной оси при сохранении дальнего порядка в расположении молекул. Вследствие различной симметрии кристаллографических ячеек, для  $n$ -алканов с четной длиной цепи происходит переход в фазу RII (ромбоэдрическая ротационная), а с нечетной — первоначально в фазу RI (орторомбическая ротационная), однако затем осуществляется низкоэнергетический переход в фазу RII и, следовательно, четные и нечетные  $n$ -алканы становятся эквивалентными для последующего ФП-2.

Можно предположить, что в коротких  $n$ -алканах ( $C_{16}H_{34}$ ,  $C_{18}H_{38}$ ,  $C_{20}H_{42}$ ) потенциальный барьер перехода из триклинной фазы в промежуточную ротационную близок к барьеру перехода из триклинной фазы сразу в расплав, в связи с чем на зависимостях ДСК при нагревании соответствующие ФП пики теплоемкости сливаются и не удается выделить твердофазный переход в чистом виде. Тогда как в нечетных  $n$ -алканах потенциальный барьер перехода из орторомбической фазы в промежуточную ротационную заметно меньше, чем барьер перехода из орторомбической фазы в расплав и вследствие этого твердофазный переход происходит на несколько градусов раньше плавления. Из рис. 3, a видно, что возрастающие от  $n$  зависимости температур ФП-1 при нагревании в четных (штрихованная линия) и нечетных (штрихпунктирная линия)  $n$ -алканах имеют противоположный наклон относительно зависимости температур ФП-2, следовательно, доля увеличения потенциального барьера для перехода из исходной фазы в промежуточную ротационную ( $\Delta E$ ) в каждом следующем четном  $n$ -алкане уменьшается ( $\Delta E_{n+1}/\Delta E_n < 1$ ), а в нечетном увеличивается ( $\Delta E_{n+1}/\Delta E_n > 1$ ). Для ФП-1 при охлаждении будет справедлив аналогичный подход. Потенциальный барьер перехода из промежуточной ротационной фазы в равновесную в твердом состоянии

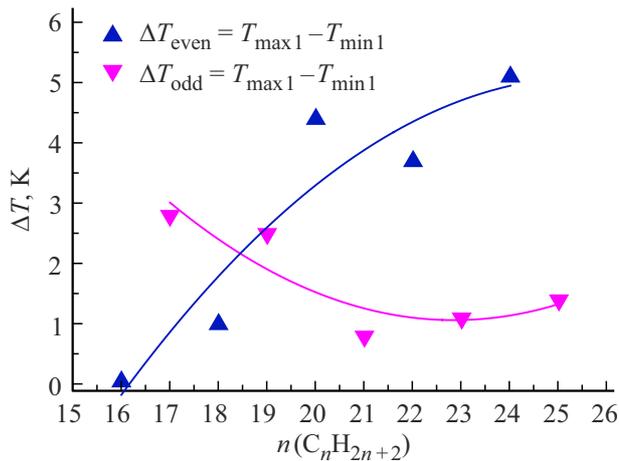


Рис. 4. Зависимость температурного гистерезиса от длины цепи в гомологическом ряду *n*-алканов.

(триклинную фазу в четных и орторомбическую в нечетных *n*-алканах) с ростом *n* увеличивается на меньшую долю в четных, и большую долю в нечетных *n*-алканах. Такое предположение объясняет противоположный характер зависимостей *n*-алканов разной четности, наблюдаемый на рис. 3 *b*.

Исследование гистерезисных эффектов ФП-1 в *n*-алканах также представляет значительный интерес. Величины истинных температурных гистерезисов ФП-1 ( $T_{\max 1} - T_{\min 1}$ ) в зависимости от длины цепи *n*-алкана и их аппроксимации полиномами 2-го порядка представлены на рис. 4. Можно отметить, что и в этом случае наблюдается явное различие в поведении зависимостей от *n* для четных и нечетных *n*-алканов. Для четных образцов наблюдается увеличение гистерезиса с ростом *n* от 16 до 24, тогда как для нечетных наблюдается уменьшение гистерезиса при возрастании *n* от 17 до 21, а затем некоторое возрастание при дальнейшем увеличении *n* до 25.

Выяснение природы гистерезисных эффектов является обширной задачей и требует проведения дополнительного экспериментального и теоретического анализа, что будет проводиться нами в дальнейшем.

В данной работе мы акцентируем внимание на изучении кинетики протекания ФП-1. Важное значение имеет форма пиков теплоемкости, поскольку именно она содержит информацию о процессах протекания ФП. В этой связи впервые был проведен анализ формы пиков ФП-1 как при нагревании, так и при охлаждении. Как видно из рис. 1, в  $C_{16}H_{34}$ ,  $C_{18}H_{38}$  и  $C_{20}H_{42}$  пики твердофазных переходов не выделяются на фоне пиков плавления при нагревании, а в  $C_{16}H_{34}$  и  $C_{18}H_{38}$  и на фоне кристаллизации при охлаждении. Поэтому пики этих совмещенных переходов в дальнейшем не рассматривались.

Из рис. 1 следует, что пики ФП-1 имеют достаточно большую полуширину (1–2 К, т.е. „размыты“ по

температуре), что позволяет отнести ФП-1 в *n*-алканах к размытым фазовым переходам (РФП). Для анализа пиков теплоемкости фазовых переходов подобного типа разработана теория размытых фазовых переходов [17–19]. Основная идея теории РФП состоит в том, что зародышеобразование новой фазы происходит по гетерогенному механизму на различных дефектах с образованием межфазной границы, которая является характерным признаком ФП-1. Стабильные зародыши новой фазы, так называемые элементарные объемы превращения  $\omega$ , образуются в результате многочисленных флуктуаций. Движение возникшей межфазной границы, по мере развития ФП, происходит последовательно, путем наслаивания подобных нанозародышей друг на друга. Именно такое поэтапное развитие ФП приводит к его размытию, поскольку для образования каждого нового нанозародыша требуется некоторое дополнительное изменение энергии за счет увеличения (уменьшения) температуры на небольшие значения  $\Delta T$ , что также подтверждает гетерогенный механизм кинетики ФП-1.

Согласно теории РФП рассматриваются симметричные  $\Lambda$ -образные пики теплоемкости. Полученные нами экспериментально пики ФП-1 имеют асимметричную форму, что позволяло нам проводить разделение на симметричные составляющие согласно разработанному нами методу, подробно описанному в [20]. Оказалось, что для всех рассматриваемых образцов пики твердофазных переходов разделяются на две симметричные составляющие  $\Lambda$ -образной формы. В этой связи мы рассматриваем развитие твердофазных переходов во всех образцах в две стадии.

Теория позволяет рассчитать объемы нанозародышей  $\omega$  на каждой стадии на основании анализа формы пиков  $C_p(T)$ . В работе [18] получено соотношение для температурной зависимости теплоемкости при размытом фазовом переходе в виде

$$\Delta C_p(T) = \frac{4\Delta C_m \exp\left[\frac{B(T-T_0)}{T_0}\right]}{\left[1 + \exp\left(\frac{B(T-T_0)}{T_0}\right)\right]^2}, \quad (1)$$

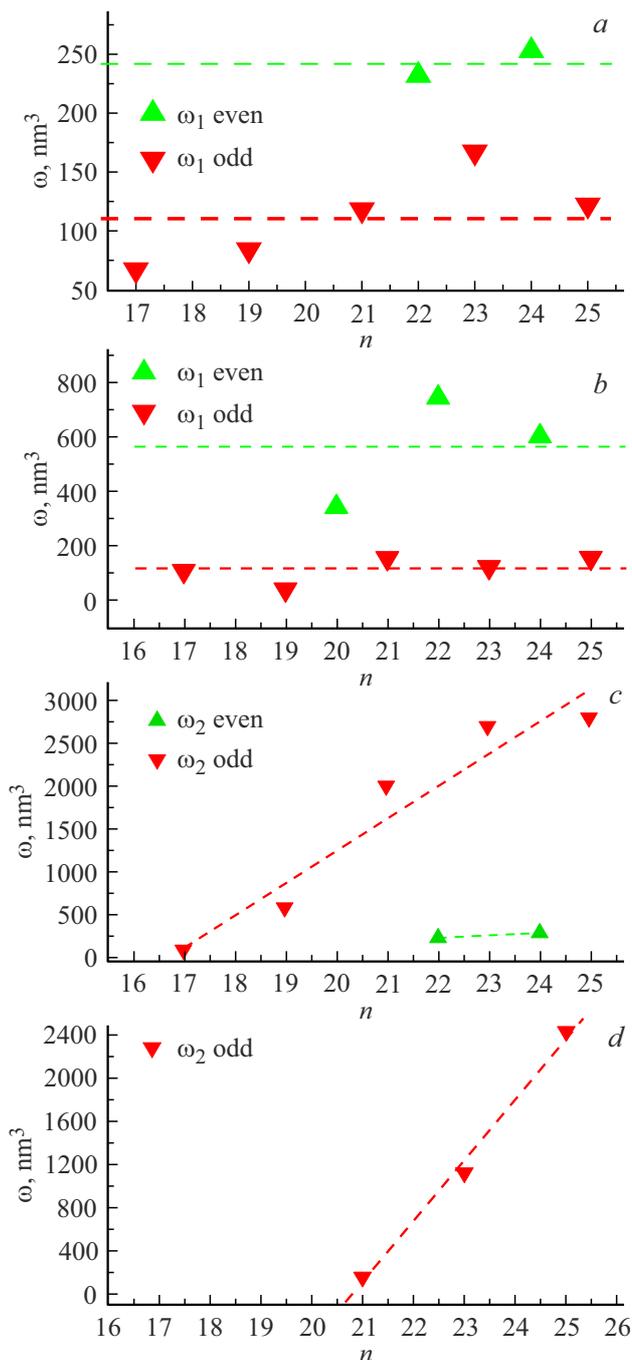
где  $T_0$  — температура ФП-1,  $B$  — атермический параметр,  $\Delta C_m$  — максимальное значение теплоемкости при  $T = T_0$ .

Атермический параметр  $B$  является структурно чувствительной величиной и определяет размытие перехода по температуре. Согласно [17] параметр  $B$  связан с элементарным объемом превращения — зародышем новой фазы, следующим соотношением:

$$\omega = \frac{BkT}{\rho q_0} \quad (2)$$

где  $q_0$  — теплота превращения,  $\rho$  — плотность,  $k$  — постоянная Больцмана.

Элементарные объемы превращения были рассчитаны по (1) и (2) для каждой из стадий ФП-1 в рассматриваемых, в соответствии с теорией РФП, *n*-алканах как



**Рис. 5.** Элементарные объемы превращения  $\omega_1$  на первой стадии ФП-1 при нагревании (a) и при охлаждении (b) и  $\omega_2$  на второй стадии ФП-1 при нагревании (c) и при охлаждении (d).

при нагревании, так и впервые при охлаждении. Элементарные объемы превращений на первой стадии ФП-1 представляют наибольший интерес, поскольку именно здесь зарождается твердофазный переход. Оказалось, что объемы нанозародышей на первой стадии также демонстрируют общую зависимость от четности  $n$ , но отличаются при нагревании и охлаждении:  $\omega \sim 110 \text{ nm}^3$  в нечетных  $n$ -алканах и  $\omega \sim 240 \text{ nm}^3$  в четных при нагре-

вании (рис. 5, a); тогда как при охлаждении  $\omega \sim 120 \text{ nm}^3$  в нечетных  $n$ -алканах и  $\omega \sim 560 \text{ nm}^3$  в четных (рис. 5, b).

На второй стадии при нагревании происходит значительное увеличение объемов нанозародышей нечетных  $n$ -алканов. С увеличением  $n$  наблюдается существенный линейный рост от 150 до  $2800 \text{ nm}^3$  с возрастанием  $n$  (рис. 5, c), тогда как в четных  $n$ -алканах увеличения не прослеживается и объемы нанозародышей первой и второй стадий оказываются примерно равны.

Пик ФП-1 при охлаждении в четных  $n$ -алканах очень узкий, напоминающий  $\delta$ -функцию, однако он еще поддается анализу согласно теории РФП и одну стадию удается надежно выделить. В то же время в коротких нечетных  $n$ -алканах ( $n = 17, 19$ ) форма пиков теплоемкости уширена и удовлетворительно симметрична, в этой связи для описания в рамках теории была выбрана одна  $\Lambda$ -образная функция. Вторую стадию при охлаждении удалось надежно выделить только у наиболее длинных нечетных  $n$ -алканов ( $n = 21, 23, 25$ ) (рис. 5, d).

Зная элементарные объемы превращений, можно оценить число молекул, входящих в нанозародыш новой фазы. Данные оценки при нагревании для первой стадии ФП-1 в исследуемых образцах показывают, что нанозародыши включают достаточно большое число молекул  $N \sim 150\text{--}500$ , в зависимости от образца. Однако нанозародыши второй стадии содержат еще большее число молекул, которое доходит до  $N = 6000$  в пентакозане. Оказалось, что на первой стадии при охлаждении нанозародыши включают  $\sim 2$  раза большее число молекул ( $N = 300\text{--}1100$  молекул), чем на данной стадии при нагревании у соответствующих  $n$ -алканов.

Вторые стадии при охлаждении удалось выделить лишь у нескольких  $n$ -алканов и в этом случае нанозародыши включают  $N \sim 300, 2500$  и  $5000$  молекул для  $n = 21, 23$  и  $25$  соответственно. В данном случае не прослеживается взаимосвязи с процессом нагревания, однако с увеличением  $n$  наблюдается очень существенный линейный рост объемов нанозародышей и, соответственно, числа входящих в них молекул (рис. 5, d).

Зная объемы нанозародышей  $\omega$  можно приблизительно рассчитать их толщину  $L$ , согласно [21] для  $n$ -алканов  $L = 1.1 \cdot \omega^{1/3}$ . Расчет величины  $L$  для первых стадий, демонстрирующих явную зависимость от четности, дает при нагревании  $L_{\text{Heven}} = 6.8 \text{ nm}$  и  $L_{\text{Hodd}} = 5.3 \text{ nm}$  для четных и нечетных  $n$ -алканов, соответственно, а при охлаждении, аналогично,  $L_{\text{Ceven}} = 9.1 \text{ nm}$  и  $L_{\text{Codd}} = 5.4 \text{ nm}$ . Толщина ламелей в  $n$ -алканах рассматриваемого гомологического ряда значительно не отличается от четности, но с ростом  $n$  варьируется от 2.2 до 3.4 nm.

Таким образом, толщины нанозародышей нечетных  $n$ -алканов совпадают при нагревании и при охлаждении, сопоставляя их значения со значениями толщин ламелей, можно установить, что в среднем нанозародыши нечетных  $n$ -алканов охватывают две ламели. Толщины нанозародышей четных  $n$ -алканов при охлаждении больше, чем при нагревании. Поскольку при структурном

ФП-1 в четных *n*-алканах происходит изменение наклона молекул, то процесс перестроения кристаллографической ячейки при нагревании и при охлаждении заметно отличается. Нанозародыши четных *n*-алканов охватывают две—три ламели при нагревании и три—четыре ламели при охлаждении.

### 3. Заключение

Проведенный в данной работе анализ профилей ДСК кривых показал значительную зависимость термодинамических параметров ФП-1 от симметрии молекул *n*-алкана, тогда как параметры ФП-2 не показали такой зависимости. Рассмотрение кинетики развития гетерогенного ФП-1 на наноуровне с помощью теории РФП позволило рассчитать элементарные объемы превращений, а также выявить их зависимость от симметрии молекулы *n*-алкана. Заметно большие объемы нанозародышей в четных *n*-алканах (~ 2 раза), по-видимому, объясняются более плотной взаимной укладкой молекул в кристаллографических ячейках триклинной симметрии, а также более плотной упаковкой концевых метильных групп и, соответственно, более сильными связями между соседними ламелями.

В работе впервые показано, что в гомологическом ряду *n*-алканов эффект четности, обусловленный различием симметрии молекул, заключается в различном поведении одновременно нескольких параметров, таких как температуры фазовых переходов первого рода, величины температурного гистерезиса ФП-1 и размеры элементарных объемов превращения гетерогенного ФП-1. Таким образом, эффект четности проявляется не только в различии обычно наблюдаемых макроскопических параметров ФП-1, но и на наноуровне, в особенностях структурных превращений молекулярной упаковки *n*-алканов.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] A. Lazaro, C. Peñalosa, A. Solé, G. Diarce, T. Haussmann, M. Fois, B. Zalba, S. Gshwander, L. Cabeza. *Appl. Energy* **109**, 415 (2013).
- [2] В.М. Егоров, А.К. Борисов, В.А. Марихин. *Письма в ЖТФ* **45**, 23, 38 (2019).
- [3] D. Cholakova, K. Tsvetkova, S. Tcholakova, N. Denkov. *Colloids Surf. A* **634**, 127926 (2022).
- [4] В.М. Егоров, В.А. Марихин. *ФТТ* **58**, 12, 2482 (2016).
- [5] В.М. Егоров, В.А. Марихин, Л.П. Мясникова, П.Н. Якушев. *ФТТ* **59**, 10, 2044 (2017).
- [6] Y. Ogawa, N. Nakamura. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **72**, 943 (1999).
- [7] В.М. Егоров, В.А. Марихин, Л.П. Мясникова. *Высокомолекуляр. соединения* **48A**, 2138 (2006).
- [8] A.-J. Briard, M. Bouroukba, D. Petitjean, N. Hubert, M. Dirand. *J. Chem. Eng. Data* **48**, 3, 497 (2003).
- [9] В.М. Егоров, В.А. Марихин, Л.П. Мясникова. *Высокомолекуляр. соединения* **47B**, 2191 (2005).
- [10] K. Illers. *Eur. Polym. J.* **10**, 911 (1974).
- [11] D.M. Small. *The Physical Chemistry of Lipids*. Plenum Press, N.Y. (1986). 262 p.
- [12] А.Е. Чичибабин. *Основные начала органической химии*. Госхимиздат, М. (1954). Т. 1. 795 с.
- [13] S.A. Gureva, A.K. Borisov, V.A. Marikhin, V.M. Egorov. *J. Phys.: Conf. Ser.* **2086P**, 012182 (2021).
- [14] В.М. Егоров, В.А. Марихин. *ФТТ* **60**, 7, 1441 (2018).
- [15] T. Yamamoto, K. Nozaki, T. Hara. *J. Phys. Chem.* **92**, 1, 631 (1990).
- [16] С.А. Гурьева, В.А. Марихин, Е.Н. Власова. *ФТТ* **65**, 12, 2286 (2023).
- [17] Г.А. Малыгин. *ФТТ* **36**, 5, 1489 (1994).
- [18] Г.А. Малыгин. *Ж. УФН* **171**, 187 (2001).
- [19] М. Фишер. *Природа критического состояния*. Мир, М. (1968). 221 с.
- [20] В.М. Егоров, А.К. Борисов, В.А. Марихин. *ФТТ* **63**, 3, 406 (2021).
- [21] В.М. Егоров, В.А. Марихин. *ФТТ* **58**, 11, 2269 (2016).

*Редактор К.В. Емцев*