

ОСОБЕННОСТИ ПРЕДПЕРЕХОДНОГО СОСТОЯНИЯ НЕМАТИКА ЭББА ПО ДАННЫМ САМОДИФФУЗИИ МОЛЕКУЛ В ИЗОТРОПНОЙ ФАЗЕ

© 2000 г. Н. В. Каширин, В. Д. Скирда, И. В. Овчинников

Казанский государственный университет

420008 Казань, ул. Кремлёвская, 18

Поступила в редакцию 18.06.98 г.

Представлены экспериментальные данные по самодиффузии молекул нематика ЭББА в объеме и в пористых средах в изотропной фазе. Обнаружено, что температурная зависимость отношения КСД ЭББА в пористой среде (D_{eff}) к КСД объемного ЭББА (D_s) при понижении температуры из режима $D_{\text{eff}}/D_s = \text{const}$ переходит в режим $D_{\text{eff}}/D_s = f(T)$ при 361 К и 355 К для пористых сред с диаметром пор 40 и 400 Å соответственно. Также обнаружено, что в объемном ЭББА вблизи температуры изотропно-нематического перехода температурная зависимость КСД отклоняется от аррениусовской и диффузионное затухание приобретает неэкспоненциальный характер. Эти факты связываются с присутствием нематически упорядоченных циботактических групп в изотропной фазе ЭББА и их влиянием на средний КСД молекул ЭББА при температурах намного выше температуры изотропно-нематического перехода. Отмечено, что в пористой среде эффект присутствия циботактических групп выражен значительно более сильно, чем в объемном ЭББА.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в нематогенах изотропно-нематический (I-N) переход является фазовым переходом первого рода [1]. Ему предшествует образование в изотропной фазе зародышей нематической фазы. Предполагается, что эти зародыши представляют собой группы локально упорядоченных молекул (циботактические группы) и характеризуются размером $\xi(T)$ ($\xi(T)$ – длина когерентности). Считается, что предпереходные эффекты ближнего порядка проявляются в очень узкой области температур: не более чем на 1 К выше температуры I-N перехода T_{I-N} . При этом величина $\xi(T)$ может составлять несколько сотен ангстрем. Эти представления подтверждаются рядом экспериментов: по магнитному [2] и электрическому двулучепреломлению [3], рассеянию света [4] и др. Естественно предположить, что подвижность таких больших молекулярных объектов размером $\xi(T)$ является замедленной по сравнению с движением окружающих их молекул [1]. Поэтому присутствие циботактических групп, по нашему мнению, должно сказываться на трансляционных характеристиках системы, в частности, на среднем коэффициенте самодиффузии (КСД). Особый интерес представляет сравнение КСД молекул жидкого кристалла в объеме и в пористой среде, поскольку в последней можно ожидать усиление эффекта присутствия циботактических групп.

ЭББА В ОБЪЕМНОЙ ФАЗЕ

Нами были измерены КСД молекул нематического жидкого кристалла *n*-(*p*-этоксibenзилен)-*p*'-*n*-бутиланилина (ЭББА) в области температур от 373 до 350 К (350 К – температура I-N перехода ЭББА). КСД измеряли методом ЯМР с импульсным градиентом магнитного поля (ИГМП), используя последовательность стимулированного эха [5]. Эксперименты проводили на ЯМР-диффузомере с рабочей частотой 64 МГц и максимальной величиной ИГМП 200 Тл/м. ЭББА марки “х. ч.”, предварительно обезгаженный методом перекристаллизации под вакуумом, запаивали в стеклянную ампулу. Образец выдерживали в датчике при каждой температуре измерения не менее 20 мин. Температуру поддерживали с точностью ± 0.1 К. Градиент температуры составлял не более 0.1 К/см. КСД определяли по начальному наклону диффузионного затухания (ДЗ) с погрешностью не более 1%.

Измеренные КСД молекул ЭББА в изотропной фазе представлены на рис. 1 в виде зависимости логарифма КСД от обратной температуры. Эта зависимость удовлетворительно описывается обычным уравнением Аррениуса (рис. 1, сплошная линия):

$$D(T) = D_0 \exp(-E/kT),$$

где $D(T)$ – коэффициент самодиффузии при температуре T , D_0 – предэкспоненциальный множитель, k – постоянная Больцмана. Энергия активации составляет $E = 28.5$ кДж/моль. Это соответст-

вует ранее полученным значениям E [6, 7] для ЭББА по данным ЯМР-релаксации и самодиффузии в изотропной фазе. Однако в области температур от 354 К до T_{I-N} наблюдается незначительное отклонение температурной зависимости КСД от экспоненциальной в сторону понижения КСД. В этой же температурной области была замечена тенденция в изменении формы диффузионного затухания. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены ДЗ при температурах 357 К и 353 К в координатах $\log A/A_0 = f(kg^2)$, где $k = \gamma^2 \delta^2 t_d D$ (g – величина ИГМП, A – амплитуда эха при градиенте g , A_0 – амплитуда эха при $g = 0$, δ – длительность градиента магнитного поля, t_d – время диффузии, γ – гиромагнитное отношение протона). Видно, что если при температурах выше 354 К ДЗ является экспоненциальным (рис. 2, кривая 1), то при температурах ниже 354 К оно приобретает слабо выраженную неэкспоненциальность (рис. 2, кривая 2).

Полученные результаты можно интерпретировать как следствие многофазности системы [5]. Возникновение фаз с различной трансляционной подвижностью вблизи температуры перехода T_{I-N} разумно связать с наличием по крайней мере двух состояний молекул ЭББА: свободного и образующего зародыши жидкокристаллического состояния. С этих же позиций можно трактовать и наблюдаемое отклонение температурной зависимости от аррениусового вида. Однако оно очень незначительно и может быть обусловлено также тем, что аппроксимация температурной зависимости любой изотропной жидкости уравнением Аррениуса возможна только в узком диапазоне температур (как показано в строгих теориях жидкости, например, в теории свободного объема Врентаза – Дуды [8]).

Таким образом, обнаруженные эффекты (неэкспоненциальность ДЗ и отклонение температурной зависимости КСД от аррениусового вида) не позволяют еще с достаточной однозначностью интерпретировать их как следствие образования зародышей нематической фазы. Мы попытались получить информацию о процессах, протекающих в ЭББА в предпереходной области, качественно изменив условия эксперимента, а именно, проведя исследования трансляционной подвижности молекул ЭББА, введенных, при полном насыщении, в пористые среды.

Предварительно остановимся на некоторых особенностях самодиффузии обычных изотропных жидкостей в пористой среде.

ОСОБЕННОСТИ САМОДИФФУЗИИ ИЗОТРОПНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

КСД жидкости, заключенной в пористую среду, должен зависеть не только от характеристик

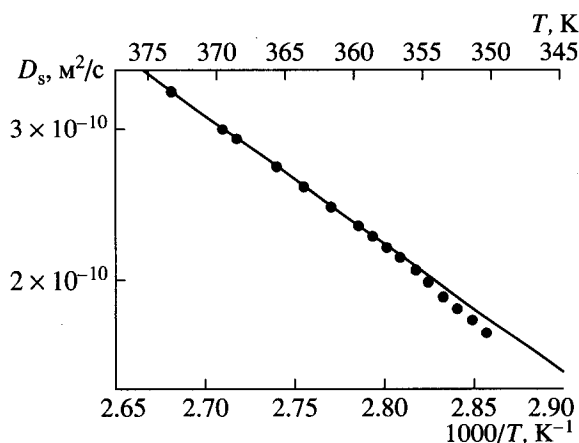


Рис. 1. Зависимость логарифма КСД молекул ЭББА от обратной температуры. Сплошная линия рассчитана по уравнению Аррениуса при использовании значения энергии активации $E = 28.5$ кДж/моль.

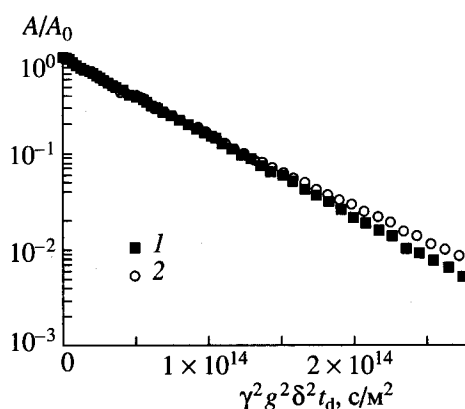


Рис. 2. Форма ДЗ в нематике ЭББА при температуре $T = 357$ К (1) и 353 К (2).

пористой среды, но и от эффективного диаметра молекулы. При исследовании самодиффузии ряда низкомолекулярных жидкостей с различной молекулярной массой (циклогексан, гексан, нонан, декан и др.) в пористом стекле “Vycor” с диаметром пор 40 Å авторы [9], основываясь на выводах [10, 11], получили эмпирическое выражение для отношения среднего КСД диффузанта, введенного в пористую среду (D_{eff}), к среднему КСД свободного диффузанта (D_s)

$$\frac{D_{eff}}{D_s} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\wp(d-a)}}, \quad (1)$$

где \wp – проницаемость, определяющая характеристики пористой среды; d – средний диаметр пор; a – эффективный диаметр молекулы, кото-

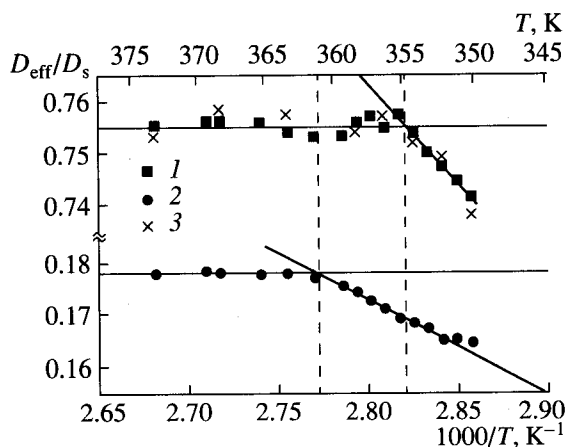


Рис. 3. Зависимости отношения D_{eff}/D_s от обратной температуры: 1 – ЭББА в пористом стекле “Bioan”, 2 – ЭББА в пористом стекле “Vykor”, 3 – ЭББА в силанизированном стекле “Bioan”. Пунктирные линии показывают температуру перехода из режима $D_{\text{eff}}/D_s = \text{const}$ в режим $D_{\text{eff}}/D_s = f(T)$.

рый определяется через молекулярную массу диффузанта M как

$$a = \alpha(M)^{1/3},$$

где α – нормировочный коэффициент. Следует отметить, что отношение D_{eff}/D_s для всех исследованных жидкостей не зависело от температуры.

Мы полагаем, что для жидкостей, в которых молекулы могут агрегировать, параметр a в выражении (1) будет отражать эффективный диаметр не самой молекулы, а всей диффундирующей кинетической единицы – агрегата, эффективная молекулярная масса которого равна $M_{\text{eff}} = nM$ (n – число молекул в агрегате). Тогда эффективный размер агрегата a_{eff} будет определяться как

$$a_{\text{eff}} = \alpha(M_{\text{eff}})^{1/3}. \quad (2)$$

В этом случае следует ожидать уменьшения отношения D_{eff}/D_s , согласно выражению (1), по сравнению со случаем движения каждой молекулы как независимой кинетической единицы.

Таким образом, исследуя самодиффузию жидкости в пористой среде, можно попытаться получить информацию о том, способны ли молекулы исследуемой жидкости образовывать агрегаты и участвовать в совместном кооперативном движении.

ЭББА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Нами были измерены КСД нематика ЭББА в пористых стеклах “Vykor” и “Bioan” с диаметрами пор 40 и 400 Å соответственно, которые характеризуются узким распределением пор по разме-

рам. Для возможно более полного заполнения пор предварительно обезгаженный ЭББА вводили в пористые стекла путем откачивания из них воздуха на вакуумной установке. Образцы запаивали в стеклянные пробирки и выдерживали при комнатной температуре в течение 48 ч. Значения температуры перехода T_{L-N} , определенные по светорассеянию, оказались для ЭББА в пористых средах ниже, чем в объеме (как и следовало ожидать [12, 13]), и составили 323 и 343 К в пористых стеклах “Vykor” и “Bioan” соответственно.

На рис. 3 представлены зависимости отношения КСД молекул ЭББА в пористых стеклах (D_{eff}) к КСД объемного нематика (D_s) от обратной температуры. Температурные зависимости D_{eff}/D_s можно разбить на две области: в первой из них значения D_{eff}/D_s не зависят от температуры, а во второй значения D_{eff}/D_s уменьшаются с понижением температуры. Пересечение асимптотической линией аппроксимирующих экспериментальных точек D_{eff}/D_s в каждой из этих температурных областей, соответствует температурам 361 и 355 К для систем ЭББА – “Vykor” и ЭББА – “Bioan” соответственно.

Полученное нами отношение $D_{\text{eff}}/D_s = 0.178$ для ЭББА в пористом стекле “Vykor” в области температур, где $D_{\text{eff}}/D_s = \text{const}$, хорошо согласуется со значением $D_{\text{eff}}/D_s = 0.175$, рассчитанным по выражению (1) для пор с $d = 40$ Å со значениями параметров $\varphi = 0.0095$ и $a = 2.75 M_{\text{ЭББА}}^{1/3}$ ($M_{\text{ЭББА}} = 281$ г/моль – молекулярная масса ЭББА). Эти же значения параметров φ и a использовались в работе [9] для аппроксимации по выражению (1) экспериментальной зависимости D_{eff}/D_s от $M^{1/3}$ для ряда низкомолекулярных жидкостей в пористом стекле “Vykor”. Причем было заранее известно, что использованные в работе [9] жидкости не образуют агрегатов.

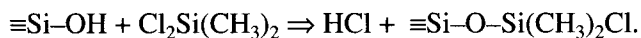
Подобных исследований в пористом стекле “Bioan” не проводилось. Однако отношение $D_{\text{eff}}/D_s = 0.755$ для системы ЭББА – “Bioan” в области температур, где $D_{\text{eff}}/D_s = \text{const}$, хорошо согласуется со значением $D_{\text{eff}}/D_s = 0.756$, экспериментально полученным в работе [14] для самодиффузии молекул гексана в том же пористом стекле “Bioan”. Более того, если воспользоваться выражением (1) при тех же параметрах φ и a и при $d = 400$ Å, то получим $D_{\text{eff}}/D_s = 0.784$. Это значение находится в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Корреляция полученных значений D_{eff}/D_s для ЭББА в пористых стеклах “Vykor” и “Bioan” с этим отношением для обычных жидкостей, а также факт независимости этого отношения от температуры выше 361 К для обеих пористых сред позволяют утверждать, что ЭББА при высоких температурах ничем не отличается от низкомоле-

кулярных изотропных жидкостей с точки зрения самодиффузии, т.е. его молекулы движутся как независимые кинетические единицы. Специфические взаимодействия молекул ЭББА с поверхностью пор и друг с другом не проявляются, и их КСД определяется характеристиками пористой среды.

Наиболее интересным является тот факт, что при температурах 361 и 355 К для ЭББА в пористых стеклах "Vycor" и "Bioran" соответственно отношение D_{eff}/D_s начинает уменьшаться. Отметим, что средний КСД при условии $\delta^2 t_d = \text{const}$ не зависит от времени диффузии. Это указывает на длинновременной режим среднего КСД [14]. Для объяснения уменьшения отношения D_{eff}/D_s можно выдвинуть два предположения. **Во-первых**, известно, что основную роль в ориентации нематической мезофазы играет взаимодействие молекул нematicа с поверхностью. Тогда возникновение взаимодействия с поверхностью пористого стекла, за счет образования связей атомов азота молекул ЭББА с ОН-группами на поверхности стекла, при приближении к температуре T_{1-N} может быть причиной, приводящей к уменьшению среднего КСД. **Во-вторых**, согласно выражениям (1) и (2), уменьшение отношения D_{eff}/D_s возможно, если молекулы ЭББА образуют агрегаты, движущиеся как независимые кинетические единицы.

Для проверки первого предположения мы изменили полярность поверхности пористого стекла, а именно, провели известную процедуру силанизации стекла. Используемое нами стекло "Bioran", по данным фирмы производителя, имеет поверхность, образованную группами Si-OH, которые являются сильно полярными. Суть процедуры силанизации заключалась в обработке стекла раствором диметилдихлорсилана ((CH₃)₂SiCl₂) в толуоле и последующей промывке его толуолом. Упрощенно протекающую при силанизации реакцию можно записать в виде



В результате поверхность стекла становится существенно менее полярной.

Раствор диметилдихлорсилана в толуоле вводили в пористое стекло путем откачивания из него воздуха на вакуумной установке. Удаление раствора осуществляли методом выпаривания с одновременной откачкой паров. Процедуру силанизации повторяли 5 раз с увеличением концентрации диметилдихлорсилана в растворе на каждом этапе от 10 до 50% по весу. Промывку стекла толуолом осуществляли 10 раз аналогичным образом. Обработанный таким образом пористое стекло сушили под вакуумом при температуре 373 К в течение 24 ч.

Для доказательства того, что процесс силанизации действительно произошел, мы измерили

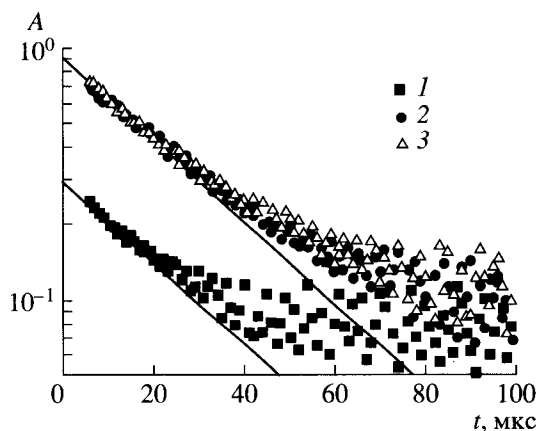


Рис. 4. Затухание сигнала свободной индукции после одиночного 90-градусного импульса: 1 — ССИ в пористом стекле "Bioran", 2 — ССИ в силанизированном стекле "Bioran", 3 — ССИ в силанизированном стекле "Bioran", насыщенном дейтерированным ацетонитрилом. Сплошные линии построены по начальным экспериментальным точкам методом наименьших квадратов.

затухание сигнала свободной индукции (ССИ) после одиночного 90-градусного импульса. Следует ожидать, что в результате полной замены протонов поверхностных ОН-групп на группы Si(CH₃)₂Cl начальная амплитуда ССИ должна увеличиться в шесть раз. На рис. 4 представлены данные о ССИ в исходном пористом стекле "Bioran" (кривая 1) и в стекле "Bioran", прошедшем силанизацию (кривая 2). Из рисунка видно, что амплитуда ССИ в силанизированном стекле "Bioran" возросла более чем в три раза. Это указывает на то, что в результате обработки около 50% протонов поверхностных полярных ОН-групп были заменены на группы, Si(CH₃)₂Cl.

Доказать то, что в результате обработки эти группы прочно связались с поверхностью пор, по нашему мнению, можно, измерив ССИ в силанизированном стекле, насыщенном не содержащим протоны растворителем. Если протоны прivityх групп прочно связаны с поверхностью, то наличие дейтерированного растворителя не должно сказаться на времени релаксации этих протонов.

В качестве растворителя мы использовали дейтерированный ацетонитрил (CD₃CN), который является хорошим растворителем как для толуола, так и для диметилдихлорсилана. На рис. 4 (кривая 3) представлен ССИ в силанизированном пористом стекле "Bioran", насыщенном D-ацетонитрилом. Отсутствие длинновременной компоненты на спаде ССИ и, более того, практически полное совпадение ССИ от этого образца с ССИ от силанизированного стекла "Bioran" (кривые 2 и 3 на рис. 4) доказывает то, что в результате обработки группы Si(CH₃)₂Cl прочно "сели" на поверхность стекла.

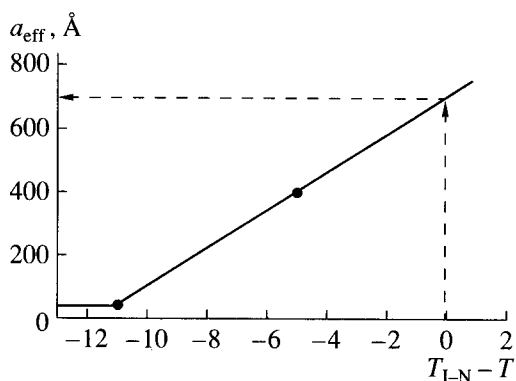


Рис. 5. Зависимость параметра a_{eff} от приведенной температуры $T_{I-N}-T$ (см. текст). С помощью пунктирных линий показана величина a_{eff} при температуре изотропно-нематического перехода.

Таким образом, результаты тестирования позволяют с полной уверенностью говорить, что в процессе силанизации пористого стекла "Bioran" более 50% атомов водорода поверхностных полярных OH-групп были заменены на "нейтральные" $Si(CH_3)_2Cl$ -группы, которые прочно связаны с поверхностью пор.

На рис. 3 (кривая 3) представлена температурная зависимость отношения КСД молекул ЭББА в силанизированном стекле "Bioran" к КСД ЭББА в объеме. Подобные измерения в пористом стекле "Vicos" не проводились, поскольку в результате силанизации диаметр пор уменьшается на 6 Å, а для пор диаметром 40 Å это существенное изменение размера. Как ясно видно из рис. 3, полученная температурная зависимость отношения D_{eff}/D_s в силанизированном пористом стекле "Bioran" практически совпадает с аналогичной температурной зависимостью в необработанном стекле. Это означает, что изменение полярности поверхности стекла не повлекло за собой изменения в динамическом поведении молекулярной системы в пористой среде и, с нашей точки зрения, свидетельствует о том, что уменьшение отношения D_{eff}/D_s при понижении температуры обусловлено не влиянием поверхности на трансляционную подвижность молекул, а другими факторами.

Таким образом, единственно возможным объяснением факта уменьшения отношения D_{eff}/D_s при температуре ниже 361 К для системы ЭББА—"Vicos" и 355 К для системы ЭББА—"Bioran", по нашему мнению, остается второе предположение, согласно которому молекулы ЭББА образуют агрегаты молекулярной массы M_{eff} , и размером a_{eff} . Характерной температурой является температура перехода из режима $D_{eff}/D_s = const$ в режим $D_{eff}/D_s = f(T)$. Физический смысл ее заключается в том, что при этой температуре эффективный размер a_{eff} агрегата становится достаточным для того, чтобы начали проявляться ог-

раничения, вводимые пористой средой на трансляционную подвижность этого агрегата как единой диффундирующей кинетической единицы. Грубо можно считать, что это условие реализуется в том случае, когда a_{eff} становится сравнимым с диаметром поры и, следовательно, при $T = 361$ К a_{eff} по порядку величины имеет размер 40 Å и увеличивается до значения порядка 400 Å при $T = 355$ К. Используя эти значения, можно качественно оценить рост размера агрегатов при понижении температуры. В линейном приближении аппроксимация зависимости a_{eff} от приведенной температуры ($T_{I-N}-T$) (рис. 5) дает размер агрегата порядка 700 Å при температуре T_{I-N} , что неплохо согласуется с оценками $\xi = 400-600$ Å для размеров циботактических групп в изотропной фазе нематиков при температурах, близких к T_{I-N} [1-4].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Процесс самоагрегации представляет собой объединение молекул в единую динамическую и кинетическую единицу, а специфика нематика такова, что молекулы его имеют тенденцию выстраиваться длинными осями параллельно друг другу [1]. Тогда естественно предположить, что обнаруженный процесс самоагрегации молекул ЭББА есть не что иное как образование циботактических групп.

Влияние этих групп хорошо проявляется при исследовании нематика ЭББА в пористой среде по сильной зависимости от температуры отношения D_{eff}/D_s (рис. 3). Однако, как отмечалось выше, температурная зависимость среднего КСД объемного нематика достаточно слаба. В связи с этим возникает необходимость согласовать результаты, полученные для чистого ЭББА и ЭББА, введенного в пористую среду. Это, по нашему мнению, возможно в том случае, если относительная доля молекул, образующих циботактическую группу, составляет малую величину. Для чистого ЭББА измеряемый нами средний КСД в первом приближении определяется, согласно [5], выражением

$$D_s = P_i D_i + P_c D_c, \quad (3)$$

где P_i — относительная доля протонов, находящихся на молекулах изотропного окружения, D_i — их КСД; P_c — относительная доля протонов, находящихся на молекулах, составляющих циботактические группы, D_c — КСД этих групп. Выражение (3) записано из условия независимости процессов трансляционной подвижности свободных молекул и молекул, входящих в состав циботактической группы. При малых значениях P_c вклад циботактических групп в D_s незначителен, даже если их КСД много меньше КСД молекул изотропного окружения. Малая концентрация циботактичес-

ких групп объясняет и слабое отклонение ДЗ от экспоненты в пределах чувствительности использованной нами аппаратуры.

Совершенно другая ситуация возникает в ЭББА, введенном в пористую среду. В длинновременном режиме среднего КСД, при котором КСД не зависит от времени диффузии t_d , среднеквадратичный пробег молекулы $\langle r^2 \rangle$ за время диффузии, определяемый уравнением Эйнштейна

$$\langle r^2 \rangle = 6t_d D(T),$$

должен быть много больше размера поры. В нашем случае среднеквадратичный пробег составляет приблизительно $2 \times 10^4 \text{ \AA}$ и $4 \times 10^4 \text{ \AA}$ для диффузии молекулы ЭББА в пористых стеклах "Vycor" и "Vioran", соответственно, что существенно больше размеров пор. Таким образом, условие длинновременного режима среднего КСД достаточно хорошо реализуется, и КСД определяется только характеристиками пористой среды. В отсутствие агрегатов или при малом их размере молекулы ЭББА достаточно свободно перемещаются по всему объему пористого пространства. В то же время возникновение даже малого количества агрегатов, размеры которых сравнимы с размерами пор, может приводить к закупорке части каналов, соединяющих поры. В этом случае выражение (3) не может оставаться справедливым, так как неагрегированные молекулы теряют свободу перемещения и их подвижность в пористой среде оказывается фактически зависящей от подвижности агрегатов. Возникновение мало-подвижных агрегатов с размерами порядка размера пор, приводящее к закупорке части каналов, можно переформулировать в терминах уменьшения проницаемости пористой среды для молекул диффузанта, что и приводит к резкому уменьшению среднего КСД.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о существовании нематически упорядоченных циботактических групп в жидком кристалле ЭББА при температурах много выше T_{I-N} – температуры изотропно-нематического перехода, в то время как теоретические расчеты [1] и некоторые эксперименты [2–4] определяют ширину температурной области существования зародышей нематика в изотропной фазе порядка 1 К. Исследуя самодиффузию жидкого кристалла в различных пористых средах, с порами разного диаметра, можно оценить средний размер циботактических групп и получить качественную картину зависимости их размеров от температуры. Важным обстоятельством является тот факт, что агрегирование даже малой доли молекул способно сильно изменить трансляционные характеристики всей молекулярной системы в пористой среде.

В заключение отметим, что наши выводы подтверждаются результатами ранних экспериментов по ЯМР-релаксации, в которых наблюдали: зависимость времени ЯМР-релаксации от частоты в изотропной фазе МББА [15, 16] даже при температуре, на 20 К превышающей температуру изотропно-нематического перехода; аномальные значения времени спин-решеточной ЯМР-релаксации во вращающейся системе координат ($T_{1\rho}$) в ПАА, устойчивые при температуре, на 8 К превышающей температуру перехода нематик-изотропная жидкость [17; 18] и др. эффекты. Эти эффекты авторы также связывали с присутствием в изотропной фазе нематически упорядоченных циботактических групп.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 97-03-32668а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Де Жен П.* Физика жидких кристаллов: Пер. с англ. / Под ред. Сониной А.С. М.: Мир, 1977.
2. *Filippini J.C., Poggi Y.J.* // J. Phys. (France). 1975. Suppl. C1. P. 139.
3. *Helfrich W., Schadt M.* // Phys. Rev. Lett. 1971. V. 27. P. 561.
4. *Litster D., Stensor T.* // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 30. P. 688.
5. *Маклаков А.И., Скурда В.Д., Фаткуллин Н.Ф.* Самодиффузия в растворах и расплавах полимеров. Казань: Изд. Казанского ун-та, 1987.
6. *Miljkovic L. et al.* // Chem. Phys. Lett. 1976. V. 38. P. 15.
7. *Ghosh S.K., Tettamanti E.* // Phys. Lett. 1973. V. 43A. P. 361.
8. *Vrentas J.S., Duda J.L.* // S. Polymer Sci., Polym. Phys. Ed. 1977. V. 15. P. 403.
9. *Скурда В.Д., Скурда М.В.* // Сборник статей "Структура и динамика молекулярных систем". Йошкар-Ола: Изд-во Марийского технического ун-та, 1997. С. 186.
10. *Powles J.G., Mallet M.J.D., Rickayzen G., Evans W.A.B.* // Proc. Roy. Soc. A. 1992. V. 436. P. 391.
11. *Mitzithras A., Conveney F.M., Strange J.H.* // Mol. Liq. 1992. V. 54. P. 273.
12. *Grinberg F., Kimmich R.* // Chem. Phys. 1996. V. 105. P. 3301.
13. *Srannarius R., Cramer Ch., Kremer F.* Thirteenth European Experimental NMR Conference. 1996. P. 793.
14. *Валиуллин П.П.* Некоторые особенности самодиффузии низкомолекулярных жидкостей в пористых средах. Дис. ... канд. физ.-мат. наук, 541.64.:536.7:543.422.23. Казань: Казанский государственный университет, 1996.
15. *Dong R.Y., Tomchuk E., Bock B.* // J. Phys. 1975. V. 53. P. 610.
16. *Байса Д.Ф., Овчаренко А.И., Трофимов А.С., Чесноков Е.Д.* // УФЖ. 1978. Т. 23. С. 1345.
17. *Wilfel W., Noack F., Stohrer M.Z.* // Naturforsch. 1975. V. 30A. P. 437.
18. *Blinc R., Hogenboom D.L., O'Reilly D.E., Peterson E.M.* // Phys. Rev. Lett. 1969. V. 23. P. 969.