

# Жидкие кристаллы — «кентавры» природы

В.П.Шибает

В греческой мифологии кентавры — это полулюди-полулюки, могущественные существа, наделенные силой лошади и разумом человека. Называя жидкие кристаллы и жидкокристаллические (ЖК) вещества кентаврами природы, я хочу лишь подчеркнуть необычность их строения, предопределяющего сочетание прямо противоположных свойств — текучей жидкости и кристаллического тела.

Такие гибридные соединения существуют в природе и создаются руками нас, химиков [1]. Мы действительно можем совмещать в одном веществе самые разнообразные молекулярные фрагменты и получать множество соединений, в том числе жидкие кристаллы и ЖК-полимеры. Сегодня уже никого не удивит необычное сочетание таких слов, как ЖК-телевизоры, ЖК-экраны, ЖК-мониторы, и мы даже не задумываемся, какой смысл скрывается за этими названиями. Попробуем «расшифровать» их значение, но сначала заглянем в прошлое [2].

## Немного истории

Австрийский ботаник Ф.Рейнитцер (1857—1927), работавший в Институте физиологии растений в Высшей немецкой технической школе в Праге, изучал эфиры холестерина. В 1888 г.



**Валерий Петрович Шибает**, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ, лауреат Государственной премии СССР (1985), премии Президиума РАН им.В.А.Каргина (2002) и Ломоносовской премии МГУ (2006), заслуженный деятель науки РФ. Научные интересы связаны с синтезом, изучением структуры и физико-химических свойств термотропных жидкокристаллических полимеров.

Рейнитцер обнаружил необычный эффект двойного плавления одного из эфиров, а именно холестерилбензоата. Это кристаллическое соединение плавилось при 145°C, но затем не переходило в прозрачный расплав, а превращалось в мутную, сильно рассеивающую свет, жидкость. Когда температура достигала 179°C, жидкость будто бы плавилась повторно — и становилась прозрачным расплавом (рис.1).

Эту температуру Рейнитцер назвал точкой просветления. Удивленный результатами, он отправил исследуемые им препараты немецкому кристаллографу О.Леману с просьбой помочь разобраться в странном поведении холестерилбензоата. С помощью поляризационного микроскопа Леман установил, что мутная фаза, наблюдаемая Рейнитцером, анизот-

ропна и обладает двойным лучепреломлением, свойственным только кристаллическим соединениям. Поскольку анизотропия присуща твердому кристаллу, а вещество в мутной фазе, в интервале температур 145—179°C, было жидким, Леман назвал его жидким кристаллом. (Подобного рода соединения в то время часто называли также кристаллическими жидкостями и мягкими кристаллами.)

Впоследствии вещества, способные выше точки плавления сочетать свойства жидкостей (текучесть) и кристаллических тел (анизотропию), стали называть жидкокристаллическими, или жидкими кристаллами\*.

\* Их называют также и мезоморфными веществами, а образуемую ими ЖК-фазу — мезофазой (от греч.  $\mu\epsilon\sigma\omicron\varsigma$  — промежуточный, средний и  $\phi\alpha\sigma\alpha$  — фаза).

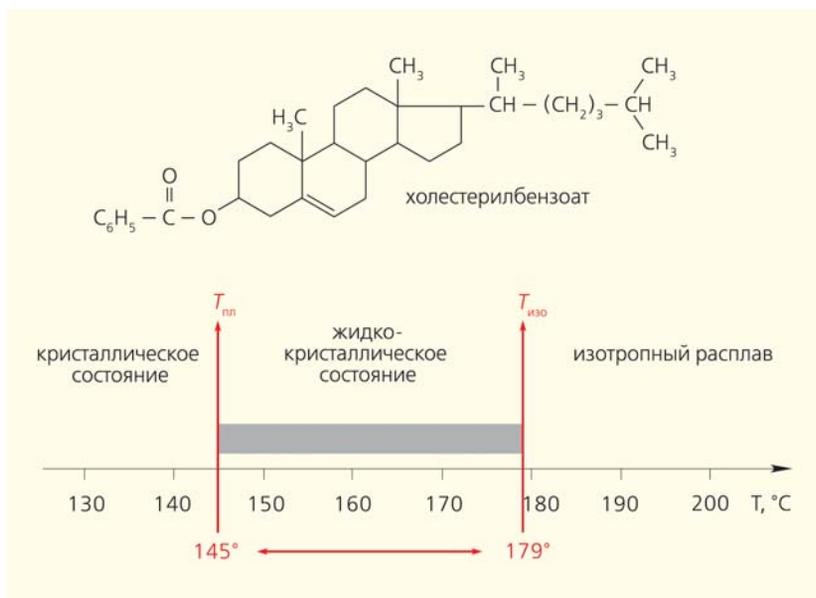


Рис.1. Диаграмма фазовых состояний холестерилбензоата. Этот сложный эфир холестерина был первым жидкокристаллическим соединением, исследованным австрийским ботаником Ф.Рейнитцером в 1888 г.

Однако чтобы понять природу ЖК-состояния веществ, установить их структурную организацию, изучить особенности фазового поведения и физических свойств жидких кристаллов, потребовался не один десяток лет. Первоначальное «неприятие» учеными столь необычных соединений вполне понятно, ведь считалось, что существуют только три состояния веществ — твердое, жидкое и газообразное. Но жидкие кристаллы не «вписывались» ни в одно из них и потому рассматривались как коллоидные растворы, или эмульсии, а в действительности оказалось, что представляют собой четвертое состояние вещества. Активные исследования мезоморфных веществ начались в 1920—1930-х годах. Работы Д.Форлендера в Германии во многом способствовали синтезу новых ЖК-соединений. Французский ученый Ж.Фридель, занимавшийся структурой жидких кристаллов, в 1922 г. предложил их первую структурную классификацию. Чуть позднее голландец С.Озеен и чех Х.Цохер создали теорию упругости [об этом см. 2].

В СССР первыми исследователями жидких кристаллов были профессор В.К.Фредерикс (1885—1944) и аспирант Ленинградского государственного университета В.Н.Цветков (1910—1999). Еще в начале 30-х годов они изучали физические свойства этих соединений: поведение в электрических и магнитных полях, реологические и диэлектрические характеристики. К сожалению, Великая Отечественная война и трагическая смерть Фредерикса прервали научные исследования. Однако основы современной электро- и магнитооптики жидких кристаллов, признанные классическими, были заложены именно в работах Фредерикса и Цветкова [2].

Но до 1960-х годов к жидким кристаллам проявлялся только чисто академический интерес. Правда, еще в 1936 г. Фредерикс, подготовивший материал для доклада А.Ф.Иоффе на сессии Академии наук СССР, отмечал, что жидкие кристаллы необходимо изучать как новое фазовое состояние вещества и их можно использовать «вследствие тесной связи с технически-

ми вопросами, в которых решающее значение имеет тонкий слой жидкости, примыкающей к твердому телу». Это утверждение было многократно подтверждено в дальнейших исследованиях, а структурные перестройки жидких кристаллов под действием электрического и магнитного полей вошли в историю под названием «переходы Фредерикса».

В середине 60-х годов, когда стала бурно развиваться микроэлектроника, потребовались вещества, способные быстро откликаться на воздействие внешних полей и потреблять при этом минимум энергии. И здесь на помощь пришли жидкие кристаллы. Их двойственный характер (анизотропия свойств и высокая молекулярная подвижность) позволял создавать управляемые внешним электрическим полем быстродействующие и экономичные ЖК-индикаторы. Советские ученые активно участвовали в изучении структурных особенностей жидких кристаллов и поисках путей их практического применения. Инициатором этих исследований был Чистяков, основавший первую в СССР лабораторию жидких кристаллов сначала в Ивановском педагогическом институте (теперь это Ивановский государственный университет), а затем и в Институте кристаллографии, в Москве. Именно Чистяковым написана первая книга о жидких кристаллах на русском языке [3].

60-е и 70-е годы прошлого века можно назвать временем «жидкокристаллического бума». Помимо весьма активных исследований этих «кентавров» созидались международные и национальные конференции и симпозиумы, организовывались школы молодых ученых. За короткое время был выпущен десяток тематических сборников и монографий. Кроме изучения жидких кристаллов проводились синтез и исследование жидкокристаллических и мезоморф-

ных полимеров [4–6]. Об этих «полимерных кентаврах» пойдет речь в следующей статье.

Лавинообразный поток научных публикаций в этой области привел даже к изменению названия международного журнала «Molecular Crystals», он превратился в «Molecular Crystals and Liquid Crystals». С 1986 г. в Великобритании начал издаваться ежемесячный журнал «Liquid Crystals», а в 1990 г. было создано Международное общество по жидким кристаллам (International Liquid Crystals Society) со своим печатным изданием «Liquid Crystals Today». В разных странах появились национальные отделения этого общества. В России в 1992 г. было образовано «Содружество» — общество по жидким кристаллам, куда вошли ученые из стран СНГ, Германии, Италии, Болгарии и других государств Европы. В 2001 г. у этого общества появился свой журнал — «Жидкие кристаллы и их практическое применение». (Кстати, его главный редактор Н.В.Усольцева — продолжательница работ чистяковской школы.) Особо следует отметить Нобелевскую премию (правда, по физике), присужденную французскому ученому П.Ж. де Жену за выдающиеся исследования сложных форм материи, в частности жидких кристаллов и полимеров [7].

В настоящее время поиск и исследование ЖК-систем активно продолжают. Каждые два года созываются европейские и международные конференции по жидким кристаллам, не считая двух-трех тематических симпозиумов по отдельным направлениям их изучения. Химики создают новые экзотические типы «кентавров», а физики и инженеры пытаются разгадать и использовать далеко не простые особенности поведения столь необычных соединений.

Хотя почти каждый человек пользуется приборами, в которых работают жидкие кристаллы, далеко не всем известно, как это происходит. В «Природе»

о них неоднократно публиковались статьи разного характера\*, но, несмотря на это, не грех напомнить, что представляют собой эти необычные вещества, привлекая внимание многих исследователей. Каковы особые свойства этих загадочных жидкостей, сделавшие их практически незаменимыми сегодня?

## Молекулярное строение и структура

Сейчас известны уже десятки тысяч органических соединений, которые могут находиться в ЖК-состоянии, и число их непрерывно увеличивается. Эти соединения бывают термотропными (образуются при нагрева-

\* См., напр.: *Группа по изучению жидких кристаллов Университета Орсе*. Жидкие кристаллы (1972. №2. С.67–75); *Сонин А.С., Степанов Б.М.* Приборы на жидких кристаллах (1974. №11. С.14–22); *Чистяков И.Г., Селезнев С.А.* Биологическая роль лиотропных жидких кристаллов (1977. №9. С.38–45); *Островский Б.И.* Разнообразие жидких кристаллов (1997. №7. С.50–60).

нии или охлаждении) и лиотропными (их получают растворением твердых тел в определенных растворителях). Здесь речь пойдет о термотропных жидких кристаллах.

Главные особенности всех таких соединений — анизометричная форма и жесткость составляющих их молекул. Наиболее известны и широко распространены **каламитики** (от греч. *καλαμύς* — тростник), построенные молекулами стержнеобразной формы. Большинство каламитиков состоит из двух или трех бензольных колец, связанных между собой непосредственно или с помощью химических групп (рис.2)\*\*.

Вместо бензольных колец в молекулах могут быть циклогексановые и гетероциклические фрагменты, а также производные холестерина.

Помимо каламитиков существуют и другие типы жидких

\*\* Сами молекулы ЖК-соединений очень часто называют мезогенами, а жесткие фрагменты молекул, способствующие формированию ЖК-фазы — мезогенными группами.

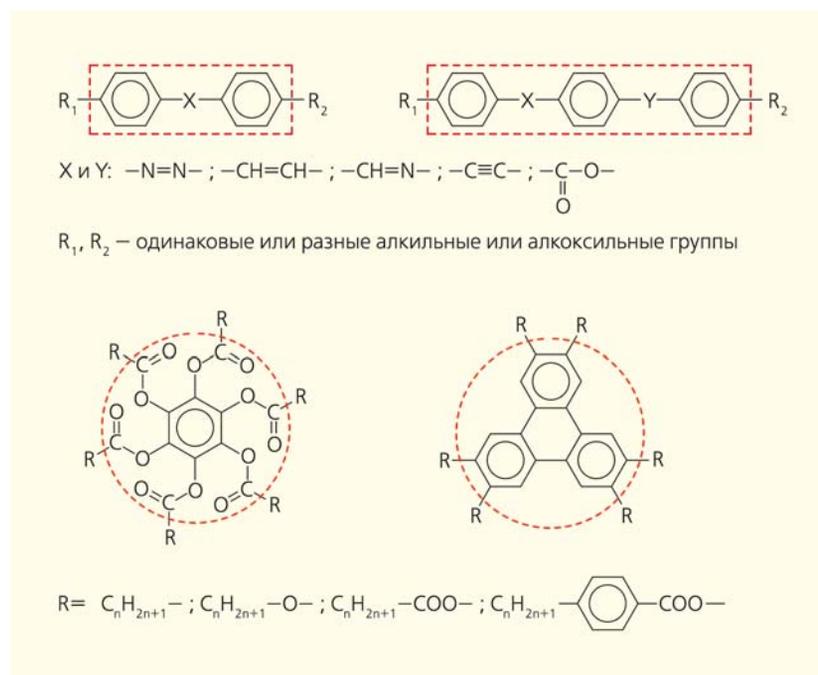


Рис. 2. Примеры химических соединений, образующих ЖК-фазы из стержнеобразных (вверху) и дискообразных молекул. Мезогенные группы показаны пунктиром.

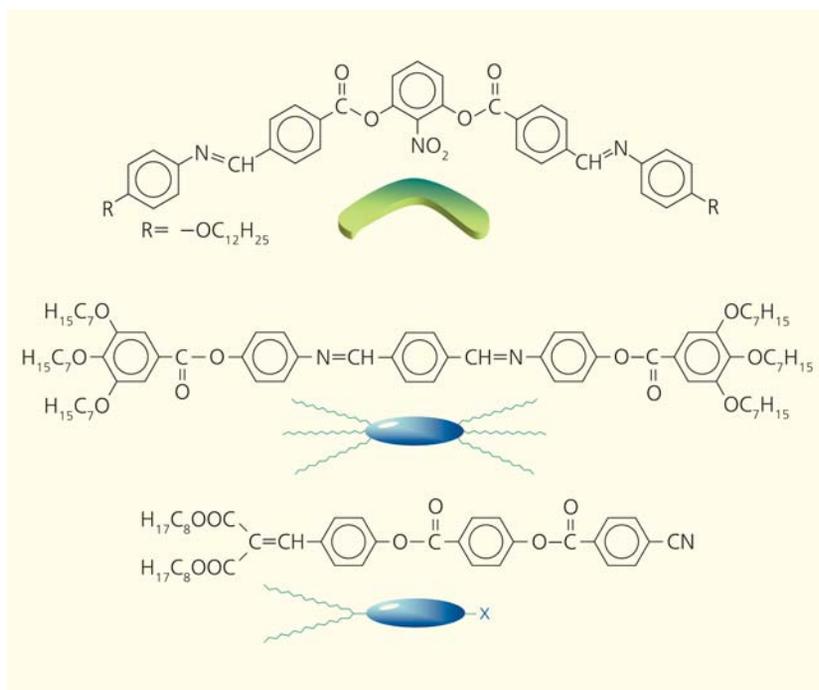


Рис.3. Формы молекул химических соединений, формирующих экзотические жидкие кристаллы: бананоподобная (вверху), фазмидная (в середине) и форма «ласточкина хвоста».

кристаллов, молекулы которых имеют планкообразную или дискообразную формы. Последние обычно содержат несколько длинных гибких цепей, связанных с центральной (жесткой) частью диска, образуя **дискотический** тип мезофазы (см. рис.2).

И, наконец, уже в этом веке обнаружены жидкие кристаллы, сформированные бананоподобными молекулами, пример тому — производное 2-нитропореорцинола (рис.3).

Существуют и довольно экзотические жидкие кристаллы: одни построены из молекул-фазмид,\* другие — из молекул, форма которых похожа на ласточкин хвост (см. рис.3).

Объединяющая особенность молекул жидких кристаллов — асимметричность. Именно она обеспечивает анизотропию по-

ляризуемости. Этим же обусловлена и тенденция к расположению молекул преимущественно параллельно друг другу вдоль их длинных или коротких осей.

В соответствии с классификацией Фриделя различают три основных типа ЖК-структур: **нематический**, **смектический** и **холестерический**. Характер упаковки в них молекул во многом определяется их геометрической формой и химическим строением (рис.4). Нематический тип — самый простой, в нем существует только одномерный ориентационный порядок вдоль длинных (в каламатах) или коротких (в дискотиках) осей молекул. (Направление преимущественной ориентации длинных осей молекул называется директором жидкого кристалла и обозначается вектором  $\vec{n}$ ) Поскольку центры тяжести молекул расположены в пространстве хаотично, трансляционный порядок отсутствует. Смектический тип ближе всего к структуре кристаллических тел, молекулы

в нем собраны в слои, а центры тяжести подвижны в двух измерениях. Длинные оси молекул в каждом слое перпендикулярны его плоскости (ортогональные смектики А и В) или наклонены под углом (наклонные смектики С). Расположение же молекул в слое бывает как хаотичным (смектики А), так и упорядоченным (смектики В).

Дископодобные молекулы могут также образовывать колончатые фазы (см. рис.4). Что касается бананоподобных молекул, структура которых интенсивно исследуется, то они способны создавать и неупорядоченную нематическую фазу, и более упорядоченную, близкую к смектическому типу упаковки (см. рис.4).

Наиболее сложный, холестерический, тип ЖК-структур характерен для хиральных соединений (оптически активных молекул). Холестерики во многом подобны нематикам — тем и другим свойствен одномерный ориентационный порядок. Однако хиральные асимметричные центры молекул холестериков или введенных в нематика небольших количеств хиральных веществ заставляют слои смещаться относительно друг друга на небольшой угол  $\alpha$ . Через определенное число слоев ориентация молекул повторяется. Так формируется закрученная спиральная супрамолекулярная структура с шагом спирали  $P=2pd/\alpha$  (рис.5). Поэтому очень часто холестерики именуют закрученными нематиками.

Такая структура обеспечивает холестерикам их особые оптические свойства. Период  $d$ , за который они меняются, зависит от шага спиральной структуры  $P$ .

Если поместить тонкий слой жидкого кристалла между прозрачными стеклами многослойной ячейки, образуется планарная текстура. В ней оси спиралей перпендикулярны плоскости стекол, а длинные оси молекул параллельны друг другу

\* Так названы эти молекулы за сходство формы с одноименными векторными молекулами ДНК, которые содержат генетические элементы плазмид и хромосом бактериофагов.

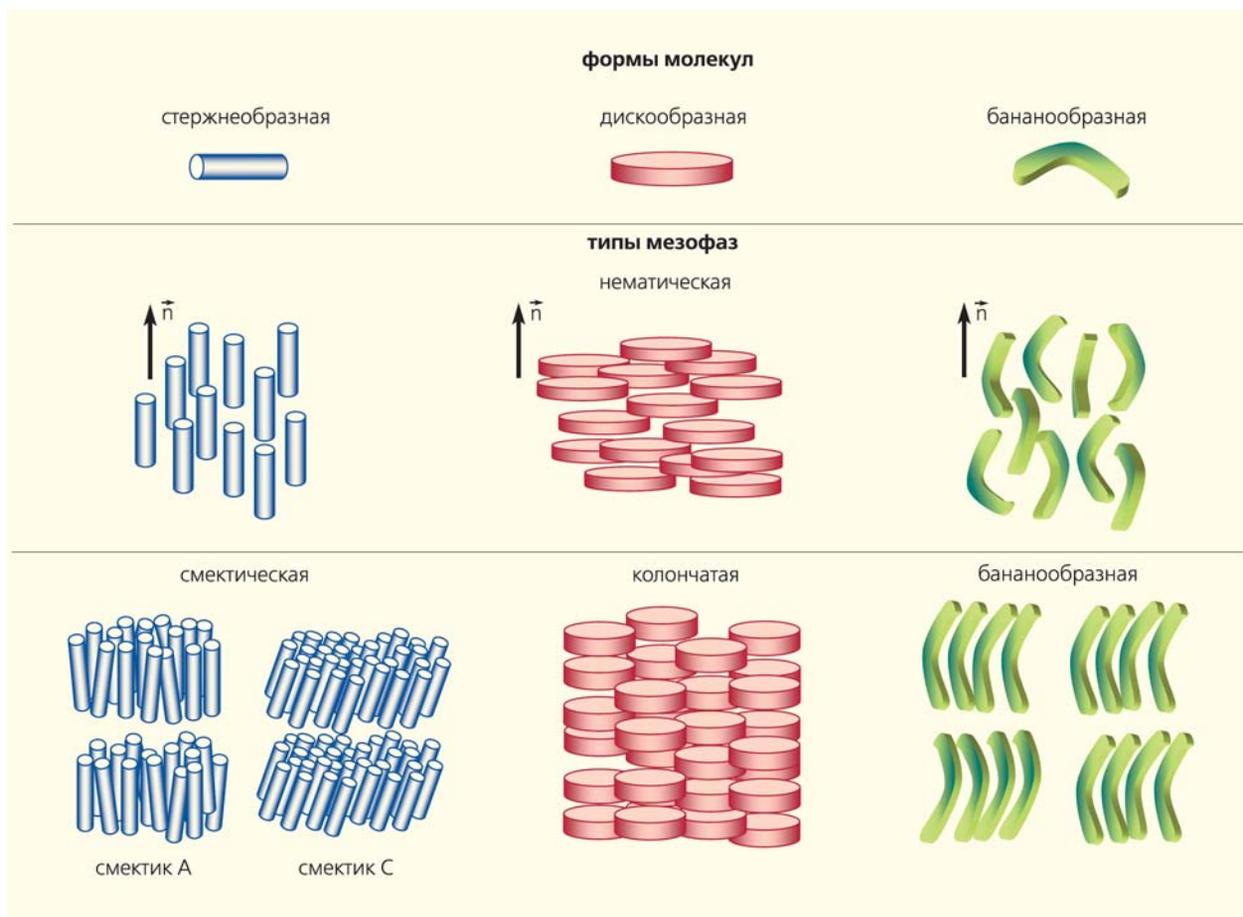


Рис.4. Формы молекул жидких кристаллов и основные типы их расположения в нематической, сметической и дискотической (колончатой) фазах.  $\vec{n}$  — директор жидкого кристалла.

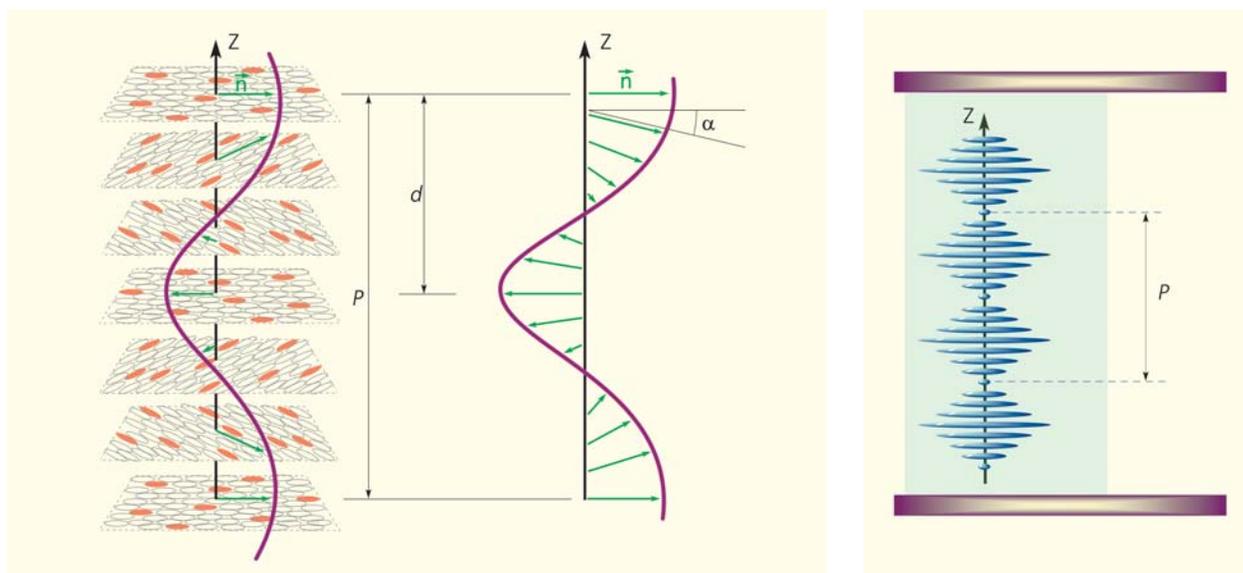


Рис.5. Упаковка стержнеобразных молекул в холестериках (слева), схема спирального расположения директора  $\vec{n}$  (в середине) и планарная структура холестерического кристалла.  $Z$  — ось спирали;  $P$  — шаг спиральной структуры;  $d$  — период изменения оптических свойств;  $\alpha$  — угол закручивания спирали. Направление директора описывает спираль относительно оси структуры.

и поверхности ячейки. Такая периодическая спиральная структура холестериков определяет их уникальную особенность — селективно отражать падающий свет.

Если угол отражения фиксирован, условия интерференции выполняются только для лучей одного цвета, и тогда слой (или пленка) холестерика кажется окрашенным именно в этот цвет. Иначе говоря, возникает эффект избирательного отражения света определенной длины волны. Ее максимум  $I_{\max}$  связан с шагом спирали  $P$ , соотношением  $I_{\max} = \bar{n}P$ , где  $\bar{n}$  — показатель преломления холестерика. Величина шага спирали определяется многими факторами — химической природой холестерика, концентрацией и геометрической формой хиральных центров (добавок). Примечательно, что не только видимый свет селективно отражается жидкими кристаллами, но также ультрафиолетовый и инфракрасный. Именно этим объясняется использование оптических свойств холестериков во многих технических областях, о чем речь впереди.

Любой тип мезофаз обычно рассматривается как непрерывная анизотропная среда, где в небольших микрообъемах (их называют роями или доменами), состоящих из  $10^4$ – $10^5$  молекул, мезогены ориентированы параллельно друг другу. Если жидкие кристаллы исследовать в поляризационном оптическом микроскопе (как это всегда делается), можно увидеть совокуп-

ность структурных деталей образца — макроструктуру, называемую текстурой. Каждый тип мезофаз самопроизвольно образует характерную для него текстуру, которая выглядит как красивая «картинка» (рис.6). Такие микрофотографии очень часто помещают на обложки научных и научно-популярных изданий [8]. Под действием небольших внешних воздействий — температуры, механического напряжения, магнитного и электрического полей и др. — текстуры легко подвергаются структурным перестройкам.

### Как работают «кентавры»

Основной признак жидких кристаллов — анизотропия физических свойств. Определяется она степенью ориентационного упорядочения молекул, и именно этот порядок обуславливает двойное лучепреломление ( $\Delta n$ ) и анизотропию диэлектрической проницаемости ( $\Delta\epsilon$ ) ЖК-соединений. Значения двулучепреломления обычно весьма велики и меняются в широких пределах: от 0.1 до 0.4 (для сравнения:  $\Delta n$  кварца составляет всего 0.01). Величина и знак  $\Delta\epsilon$  зависят от соотношения между анизотропией поляризуемости молекулы, величиной постоянного дипольного момента  $\mu$ , а также от угла между его направлением и длиной молекулярной осью (рис.7).

Приложение даже небольшого электрического напряже-

ния  $E$  (1–3 В) к неориентированному слою жидкого кристалла, помещенному между двумя токопроводящими стеклянными пластинами в электрооптической ячейке, вызывает ориентацию образца, которая определяется знаком его диэлектрической проницаемости. Если направление дипольного момента продольное, ориентация будет *гомеотропной*, если же оно поперечное, ориентация станет *планарной* (см. рис.7). Возможна также и твист, или закрученная, ориентация молекул: их длинные оси поворачиваются в направлении от нижнего к верхнему стеклу электрооптической ячейки. Ориентация жидких кристаллов достигается специальной обработкой стеклянных пластинок, например, использованием так называемых ориентантов. Это, как правило, поверхностно-активные вещества, задающие направление ориентации молекул в пристенном слое.

При наложении слабого электрического поля происходят также превращения одного типа ориентации молекул в другой (рис.8). Эти перестройки лежат в основе работы любого ЖК-индикатора, «сердце» которого — упомянутая электрооптическая ячейка. Это многослойное устройство состоит из двух поляризаторов (их плоскости поляризации противоположны), между которыми находятся две стеклянные пластинки с проводящим током напылением (т.е. электродами), а между ними — тон-

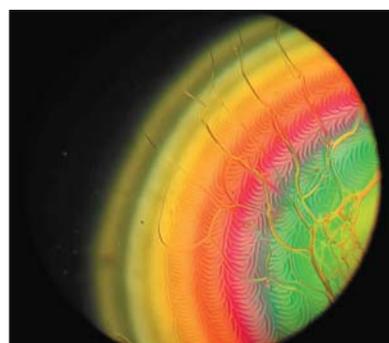
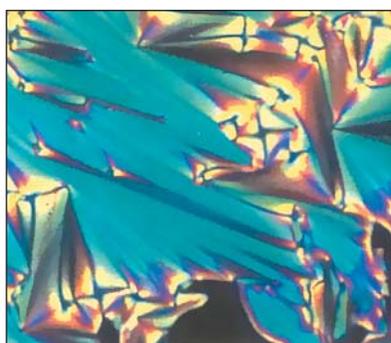


Рис.6. Типичные текстуры трех фаз жидких кристаллов — нематической, смектической и холестерической (слева направо).

кий слой (~10–20 мкм) жидкого кристалла. Напыление на нижнем электроде — сплошное, а на верхнем — в виде семи полос, в результате чего образуются семь электродов. Каждый из них «питается» электричеством и включается по заданной программе от миниатюрного генератора. Под воздействием электрического поля тип ориентации молекул жидкокристаллического слоя меняется — они выстраиваются вдоль направления силовых линий поля. Например, закрученная (твист) структура (при условии что  $\Delta\epsilon > 0$ ) превращается в гомеотропную. Свет, падающий на верхний поляризатор, становится плоскополяризованным, проходит через слой жидкого кристалла и отражается от зеркала, которое находится под нижним поляризатором. В итоге вся система освещена. Когда подается электрическое напряжение, ориентация молекул меняется и жидкокристаллический слой уже не способен поворачивать плоскость поляризации па-

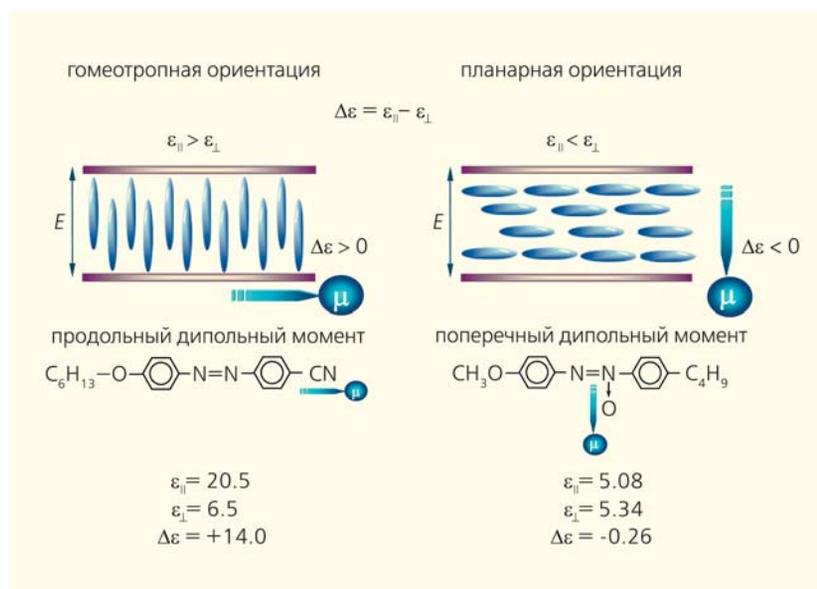


Рис.7. Анизотропия диэлектрических свойств жидких кристаллов в гомеотропной и планарной ориентациях на примере двух соединений. Здесь схематически изображены слои жидкого кристалла, ориентированные электрическим полем  $E$  (1—3 В). Поскольку диэлектрическая анизотропия ( $\Delta\epsilon$ ) определяется ориентационным порядком молекул, то при гомеотропной ориентации (дипольный момент молекул продольный) диэлектрическая проницаемость оказывается больше нуля ( $\Delta\epsilon > 0$ ), а при планарной ориентации (дипольный момент поперечный) — меньше нуля ( $\Delta\epsilon < 0$ ).  $\mu$  — величина постоянного дипольного момента;  $\epsilon_{||}$  и  $\epsilon_{\perp}$  — диэлектрические постоянные при продольном и поперечном дипольном моменте.

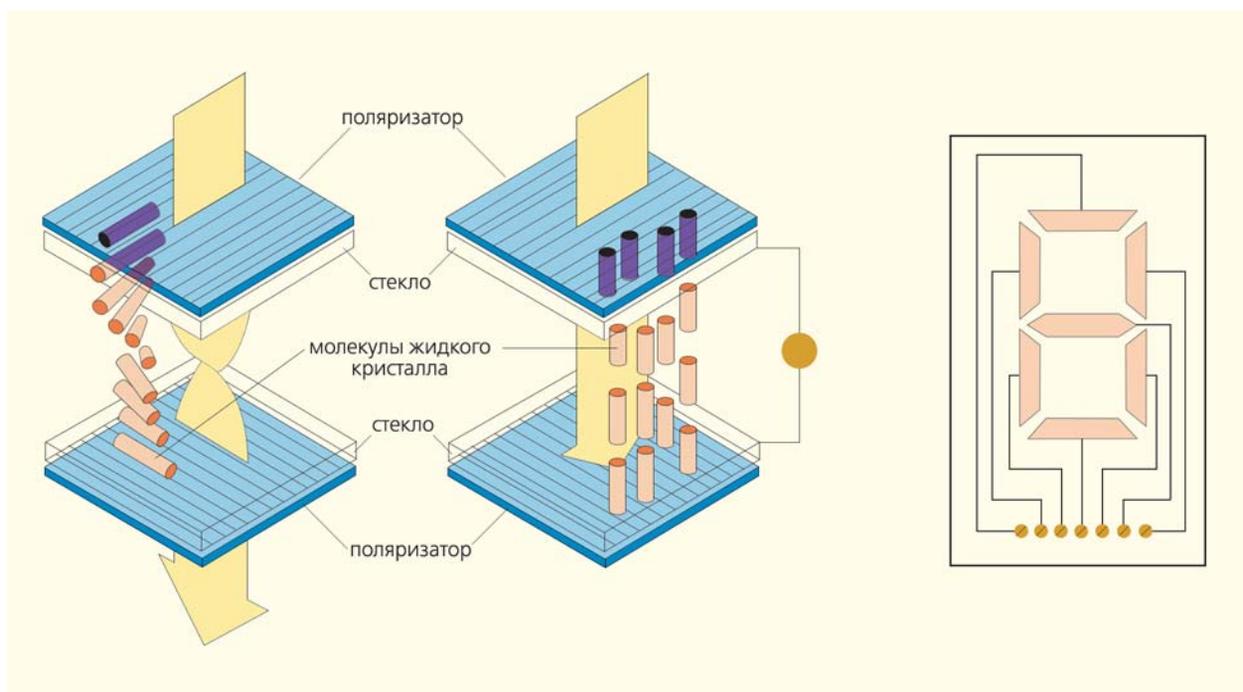


Рис.8. Схема работы ЖК-индикатора на твист-эффекте до включения (слева) и после включения (в середине) электрического поля. Описание в тексте. Справа приведен семисегментный буквенно-цифровой электрод, управляемый электрическим полем, и результат включения разных сегментов — «нарисованная» цифра восемь.

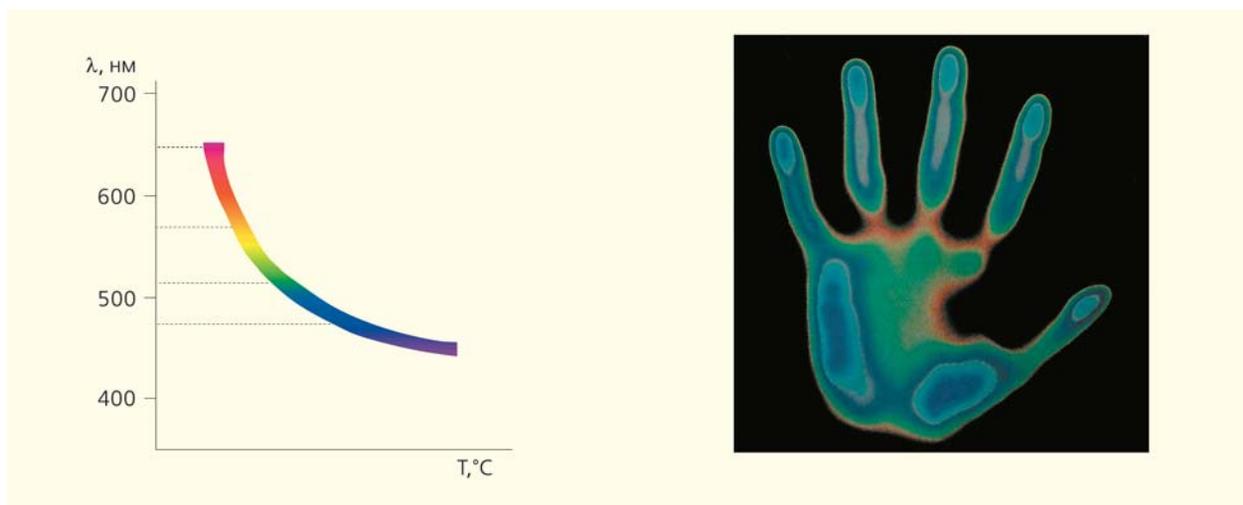


Рис.9. Влияние температуры на цвет холестерического жидкого кристалла и «цветограмма» руки человека. Красный цвет соответствует более низкой температуре, а синий — более высокой.

дающего света, он поглощается нижним поляризатором. Результат этого — непрозрачность оптической системы, темный фон на экране индикатора. Включая разные электроды, можно «рисовать» любые темные символы (буквы, цифры) на светлом поле (см. рис. 8).

У ЖК-индикаторов немало преимуществ, основные из них такие:

- низкое управляющее напряжение (1,5–5 В);
- малая потребляемая мощность (1–10 мкВт);
- быстрый (милли- или микросекунды) отклик на подаваемый сигнал;
- высокая контрастность изображения;
- малая толщина ЖК-экрана.

Все это обеспечивает легкость встраивания индикатора в любые электронные схемы (например, автомобилей, самолетов), надежность в работе и относительную дешевизну. За счет увеличения числа и более сложной конфигурации сегментов-электродов, притом с использованием цветных фильтров, созданы плоские телевизионные экраны и мониторы современных компьютеров и мобильных телефонов. ЖК-индикаторы применяются в системах оптической связи и оптической

обработки информации в быстродействующих ЭВМ.

Особый интерес представляют холестерические жидкие кристаллы — они лежат в основе создания цветуправляемых ЖК-индикаторов [9], поскольку способны изменять цветовые характеристики под влиянием температуры. Необычайно тонко организованная спиральная структура холестериков (см. рис.5) чрезвычайно чувствительна к самым разным внешним воздействиям, в том числе и тепловым. У большинства холестериков с ростом температуры шаг спиральной структуры и длина волны селективного отражения света  $\lambda_{\max}$  уменьшаются. А это, в свою очередь, приводит к изменению цвета жидкого кристалла (рис.9). Поскольку каждой температуре соответствует свой цвет, то топографию ее распределения можно получать по цветовой гамме.

Чувствительность холестериков, позволяющая «пробегать» все цвета видимого спектра в интервале 0,01–0,001°C, огромна. Значит, эти соединения могут служить высокоэффективными термоиндикаторами в технике и медицине.

Для удобства в обращении холестерики вводят в полимерные пленки и получают капсу-

лированные жидкие кристаллы. Эти пленочные материалы используются в качестве термометров, а также для визуализации и «фотографирования» тепловых полей. Чтобы увеличить цветовой контраст, в состав пленок обычно вводят черную краску. На такой пленке, наложенной на какой-либо участок человеческого тела, появляется цветное изображение, которое отражает распределение температуры. Так удастся выявлять очаги воспалительных процессов, злокачественных образований, а также диагностировать сосудистые заболевания, в частности атеросклероз и облитерирующий эндартериит\*.

Подобные пленки уже используются в медицине в качестве своеобразных «тепловизоров» для экстренной диагностики и выявления локализации воспалительных процессов в брюшной полости: при аппендиците, перитоните, холецистите.

Разрабатываются также смеси холестерических жидких кристаллов, резко изменяющие

\* Это хроническое заболевание периферических кровеносных сосудов человека с преимущественным поражением артерий стоп и голеней, уменьшением их просвета и нарушением кровоснабжения тканей.

шаг спирали, а следовательно, и цвет, под действием малых концентраций вредных паров химических соединений. Такие ЖК-индикаторы за очень короткое время (1–2 мин) меняют окраску при превышении допустимой концентрации вредных паров, т.е. играют роль химических датчиков. Интересные возможности открывает применение холестериков в дефектоскопии и неразрушающем контроле. Вследствие разной теплопроводности жидкий кристалл своим цветом тотчас же укажет те участки, где имеются дефекты. Такой способ годится, например, для оценки однородности многослойных печатных плат, качества спайки и соединений металлических и металлокерамических изделий.

Своеобразная молекулярная архитектура холестерической спирали приводит и к специфическим оптическим свойствам холестериков — круговому дихроизму и чрезвычайно высокой оптической активности.

Когда на образец планарно ориентированного жидкого кристалла падает неполяризо-

ванный свет, то в пределах области селективного отражения он расщепляется на две компоненты. Их электрические векторы поворачиваются в противоположные стороны: один — по часовой стрелке (или, что то же, — вправо), а другой — против (влево). Возникает круговой, или циркулярный, дихроизм — эффект оптической анизотропии. Если холестерическая спираль закручена влево, 50% света с левой циркулярной поляризацией отражается и столько же правой формы проходит через образец. Эта специфическая особенность холестериков позволяет создавать уникальные оптические светофильтры для видимого, УФ- и ИК-диапазонов спектра ( $\lambda = 250\text{--}10^4$  нм). Если «правые» и «левые» холестерики разделены слоем нематического жидкого кристалла, который меняет направление (знак) циркулярной поляризации света, то весь световой поток становится циркулярнополяризованным. Будет он с левой или правой закруткой, зависит от того, какой была спираль холестерика. Так получается 100%-й поля-

ризатор, который обеспечивает полное превращение естественного света в циркулярно поляризованный [8].

Другая упомянутая очень важная особенность холестериков, обусловленная их супрамолекулярной структурой, — громадная оптическая активность. Они способны вращать плоскость поляризации света на угол порядка  $20\,000^\circ$  на миллиметр толщины образца (у кристаллов кварца в  $\alpha$ -модификации, которая считается очень активной, этот угол составляет  $20^\circ$ ). Так что холестерические жидкие кристаллы — чемпионы среди известных оптически активных веществ.

\* \* \*

ЖК-соединения стали основным элементом множества разнообразных электронных приборов технического и бытового назначения, знакомых почти каждому человеку. В настоящее время прогресс и развитие ряда отраслей науки и техники уже совершенно немыслимы без жидких кристаллов, более 100 лет назад так удививших Рейнитцера. ■

## Литература

1. Шибаяев В.П. Необычные кристаллы или загадочные жидкости // Соросовский образовательный журнал. 1996. №11. С.37–46.
2. Сонин А.С. Дорога длиною в век – Из истории открытия и исследования жидких кристаллов. М., 1988.
3. Чистяков И.Г. Жидкие кристаллы. М., 1966.
4. Платэ Н.А., Шибаяев В.П. Гребнеобразные полимеры и жидкие кристаллы. М., 1980. Расширенная английская версия книги: *Plate N., Shibaev V. Comb-Shaped Polymers and Liquid Crystals*. NY, L. 1987.
5. Шибаяев В.П. Жидкие кристаллы // Энциклопедия «Современное естествознание». М., 2000. Т.6. С.146–151.
6. *Liquid Crystalline and Mesomorphic Polymers* (Eds. V.P. Shibaev, Lui Lam). NY, 1994.
7. Жен П. де Физика жидких кристаллов (перевод с англ. А.Веденова). М., 1977.
8. Пикин С.А., Блинов Л.М. Жидкие кристаллы. М., 1982.
9. Шибаяев В.П., Беляев С.В. Перспективы применения функциональных жидкокристаллических полимеров и композитов // Высокомолекулярный соед. А. 1990. Т.32. №12. С.2266–2310.