

УДК 537.9

**ПРИНЦИП НЕМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ
ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА В ТОНКИХ КАПИЛЛЯРАХ**

© 2011 г.

А.А. Вакуленко, А.В. Захаров

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

avak2vale@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Предложен немеханический принцип транспортировки жидкого кристалла (ЖК), инкапсулированного в узкую полость между двумя коаксиальными цилиндрами. Учтено взаимодействие градиента температуры и градиента поля директора, обусловленного деформацией планарно-ориентированной ЖК-полости под действием электростатического поля, создаваемого разностью потенциалов или естественно возникающего на границе раздела ЖК-фаза/твердое тело за счет плотности поверхностных зарядов. Найдены размеры зазора между ограничивающими поверхностями, кривизны цилиндров и тепловой режим, позволяющие инициировать течение ЖК-фазы в горизонтальном направлении.

Ключевые слова: жидкий кристалл, градиент температуры, двойной слой.

Наряду с широким использованием жидких кристаллов (ЖК) в производстве ЖК-дисплеев, другой областью применения ЖК является микро- и нанофлюидистика [1], которая находит широкое применение в аналитической и экспериментальной химии и биохимии, а также медицинской диагностике и фармакологии [2]. Методы микро- и нанофлюидистики также находят применение при исследовании процессов транспортировки и сортировки нанолитровых капель жидкости или ЖК в разветвленных каналах и капиллярах (lab-on-chip-system) под действием внешне-электрического поля (электрокинетика) [2].

Недавно был предложен новый метод транспортировки нанолитровых ЖК-капель, инкапсулированных в узкие микрометровых размеров каналы и капилляры под действием градиента температуры, создаваемого за счет разности температур на ограничивающих поверхностях [3–6]. Было показано, что необходимым и достаточным условием возникновения направленного горизонтального потока ЖК-фазы в канале или капилляре является взаимодействие градиентов поля температуры и поля директора ЖК-фазы. Были рассмотрены два механизма формирования поля директора: первый – посредством гибридной ориентации директора на ограничивающих поверхностях [3], второй – посредством деформации внешним (электрическим) полем планарно-ориентированной ЖК (ПОЖК)-фазы [4–6]. Надо отметить, что в случае ПОЖК-фазы, когда ориентация поля директора на ограничивающих поверхностях планарная, направленное течение только

под действием градиента температуры отсутствует. В этом случае, для инициирования горизонтального течения ЖК-фазы необходимо деформировать ПОЖК-среду, чтобы создать градиент поля директора. Этим фактором, позволяющим деформировать ПОЖК-полость, заключенную между двумя коаксиальными цилиндрами, может служить перпендикулярно направленное электрическое поле [5], а также поле двойного электрического слоя, естественно возникающее на границе раздела ЖК/твердое тело [6]. Градиент температуры в цилиндрической ЖК-полости создается двумя путями: первым – посредством перепада температур на ограничивающих поверхностях [3–5], вторым – посредством джоулева разогрева внутреннего (внешнего) цилиндра, в то время как внешний (внутренний) цилиндр термически изолирован и на нем поддерживается постоянная температура [6]. В случае двойного электрического слоя возникает вопрос: какой должна быть величина плотности заряда двойного слоя, чтобы осуществить деформацию ЖК-фазы и тем самым инициировать горизонтальный поток ЖК-материала [6]? Эта проблема исследуется в рамках обобщенной нелинейной теории Эриксона–Лесли [7, 8] с учетом термомеханического вклада в выражение для сдвигового напряжения и в уравнение баланса энтропии [3–6].

Гидродинамические уравнения, описывающие процесс транспортировки ЖК-капли, инкапсулированной между двумя цилиндрами под действием градиента температуры, состоят из уравнения баланса моментов, действующих на единицу

цу объема ЖК-фазы, уравнения Навье–Стокса для поля скорости, возбуждаемого потоком тепла \mathbf{q} в объеме ЖК-фазы, и уравнения баланса энтропии.

Баланс моментов [3–6] $\mathbf{T}_{\text{elast}} + \mathbf{T}_{\text{vis}} + \mathbf{T}_{\text{tm}} + \mathbf{T}_{\text{el}} = 0$ образован упругим $\mathbf{T}_{\text{elast}}$, вязким \mathbf{T}_{vis} , термомеханическим \mathbf{T}_{tm} и электрическим \mathbf{T}_{el} вкладами, где $\mathbf{T}_{\text{elast}} = (\delta W_{\text{elast}} / \delta \mathbf{n}) \times \mathbf{n}$, $\mathbf{T}_{\text{vis}} = (\delta R_{\text{vis}} / \delta \dot{\mathbf{n}}) \times \mathbf{n}$, $\mathbf{T}_{\text{tm}} = (\delta R_{\text{tm}} / \delta \dot{\mathbf{n}}) \times \mathbf{n}$, и $\mathbf{T}_{\text{el}} = -\varepsilon_0 \varepsilon_a \mathbf{E} \times \mathbf{n} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n})$, а $\mathbf{q} = -T(\partial R / \partial \nabla T) -$ поток тепла, W_{elast} – плотность упругой энергии, $R = R_{\text{vis}} + R_{\text{tm}} + R_{\text{th}}$ – полная диссипационная функция Рэлея с учетом вязкого, термомеханического и термического вкладов [3–6].

Уравнение Навье–Стокса: $\rho \mathbf{v}_t = \nabla \cdot \sigma$, где $\sigma = \delta R / (\delta \nabla \mathbf{v}) - P$ и P – произвольное давление.

Уравнение баланса энтропии принимает вид [3–6]: $\rho C_p \dot{T} = -\nabla \cdot \mathbf{q}$, где ρ – плотность и C_p – теплоемкость ЖК-фазы. Эти уравнения должны быть дополнены соответствующими граничными условиями для угла ориентации директора, поля скорости и температуры.

Исследовались два вида ориентаций поля директора: режим сильного $\theta(r=R_1) = \theta(r=R_2) = 0$ и слабого $\theta_{r=R_2, R_1} = Ad / (2K_1) \sin 2\theta^\pm$ сцеплений с ограничивающими поверхностями. Граничное условие для поля скорости несжимаемой ЖК-жидкости было записано в виде (условие прилипания): $\mathbf{v}(r=R_1) = \mathbf{v}(r=R_2) = 0$. Были рассмотрены два температурных режима: первый, когда поле температуры было выбрано в виде $T(r=R_1) = T_{\text{in}}$, $T(r=R_2) = T_{\text{out}}$; второй, когда через внутреннюю поверхность цилиндра в ЖК-фазу поступал однородный поток тепла \mathbf{q}_{in} , в то время как на внешнем цилиндре поле температуры было фиксировано, и граничное условие было записано в виде

$$\lambda_{\perp} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) (r=R_1) = -q_{\text{in}}, \quad T(r=R_2) = T_{\text{out}}.$$

В рассматриваемом случае внешним полем, позволяющим деформировать ПОЖК-полость, было выбрано электрическое поле, в первом случае возникающее за счет разности потенциалов, приложенных к проводящим цилиндрам [4–6], а во втором – за счет двойного электрического слоя, возникающего естественным образом на границе раздела ЖК-фаза/твердое тело [6].

В случае гибридной ориентации поля директора, когда на одном из ограничивающих цилиндров была создана гомеотропная, а на другом – планарная ориентация директора, градиент температуры по сечению ЖК-полости формировался за счет разности температур на ограничивающих поверхностях $\Delta T = T_{\text{out}} - T_{\text{in}} \sim 5\text{K}$, удалось сформировать направленный поток ЖК-жидкости в горизонтальном направлении, причем макси-

мальная скорость равна 0.5 мм/с в ЖК-полости с размерами цилиндров $R_1 = (R_2 - R_1) \sim 0.01$ (или $R_2 = 112R_1$). Было установлено, что на величину скорости влияет кривизна ограничивающих цилиндров и характер сцепления директора на более теплой ограничивающей поверхности [3]. В случае ПОЖК-полости градиент поля директора формировался под действием разности потенциалов электрического поля, приложенного к ограничивающим цилиндрам. Так, в ПОЖК-полости, образованной двумя цилиндрами ($R_2 = 1.1R_1$), при разности температур $\Delta T = T_{\text{out}} - T_{\text{in}} \sim 5\text{K}$ удалось сформировать ЖК-поток в горизонтальном направлении, причем максимальная скорость была равна $v \sim 40$ мкм/с, при значении электрического поля $E \sim 10^{-4}$ с/м². Следует отметить, что величина электрического поля влияет только на характер деформации поля директора и не влияет на величину скорости [4]. Исследования условий транспортировки ЖК-капель, инкапсулированных между двумя цилиндрами под действием градиентов температуры и поля директора, показали, что учет флексоэлектрической поляризации ЖК-среды влияет не только на характер релаксации деформированного поля директора, но и на величину гидродинамического потока, возникающего в этой ЖК-системе [5].

Другим типом электрического поля, который способен деформировать ПОЖК-полость, может служить поле, создаваемое двойным электрическим слоем, естественно возникающим на границе раздела ЖК-фаза/твердое тело. Поскольку ЖК-фаза представляет собой слабый электролит, то в пристенном слое возникает двойной электрический слой с плотностью заряда σ . Электрическое поле, создаваемое этим зарядом, пронизывает ЖК-фазу на расстояние порядка длины дебаевской экранировки λ_D [9]. Если градиент температуры в ЖК-полости создается за счет джоулева разогрева внутреннего (внешнего) цилиндра, в то время как внешний (внутренний) цилиндр термически изолирован и на нем поддерживается постоянная температура, то возникает вопрос: при каких величинах зазоров между цилиндрами плотности заряда σ достаточна для того, чтобы в деформированном ЖК-материале возник горизонтальный поток со скоростью \mathbf{v} ? Ответ на этот вопрос был дан в [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №02-09-00010-а).

Список литературы

1. Schoch R.B., Han J.Y., Renaud P. // Rev. Mod. Phys. 2008. V. 80. P. 839.

2. Mijatovic D., Eijkel J.C.T., van den Berg A. // Lab. Chip. 2005. V. 5. P. 492.
3. Zakharov A.V., Vakulenko A.A. // Phys. Rev. E. 2009. V. 90. P. 031708.
4. Zakharov A.V., Vakulenko A.A., Romano S. // J. Chem. Phys. 2009. V. 131. P. 164902.
5. Zakharov A.V., Vakulenko A.A., Romano S. // J. Chem. Phys. 2010. V. 132. P. 094901.
6. Zakharov A.V., Vakulenko A.A., Romano S. // Phys. Rev. E. 2011. (sent).
7. Ericksen J.L. // Arch. Ration. Mech. Anal. 1960. V. 4. P. 231.
8. Leslie F.M. // Arch. Ration. Mech. Anal. 1968. V. 28. P. 265.
9. Israelachvili J.N. Intermolecular and Surface Forces. London: Academic Press, 1992. 450 p.

THE NON-MECHANICAL PRINCIPLE OF THE TRANSPORT PHENOMENA OF A LIQUID CRYSTAL IN A CYLINDER CELL

A.A. Vakulenko, A.V. Zakharov

The non-mechanical principle of the transport phenomena of a liquid crystal is proposed to determine the flow between two coaxial cylinders. The interaction of the temperature gradient and the gradient of the director field due to the effect of the electric field near cylinder boundaries is accounted for. The size of the cell, the curvature and the heat regime producing the horizontal flow of the liquid crystal are determined.

Keywords: liquid crystal, temperature gradient, double electric layer.