

УДК 532.783

ОБРАТНЫЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ГИБРИДНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ НЕМАТИЧЕСКОМ ЖИДКОМ КРИСТАЛЛЕ

Р.С. АКОПЯН, Г.Е. СЕФЕРЯН, Г.Л. ЕСАЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 12 февраля 2001 г.)

Теоретически рассмотрен обратный термомеханический эффект в гибридно-ориентированном нематическом жидком кристалле. Сущность эффекта заключается в возникновении перепада температуры на стенках ячейки с жидким кристаллом из-за неоднородного гидродинамического потока в плоскости ориентации молекул и перпендикулярно возникающему градиенту температуры. При толщине ячейки порядка 10^{-4} см и скорости гидродинамического потока 10^{-1} см/сек перепад температуры составляет 10^{-3} К.

1. Введение

Термомеханические эффекты в деформированных нематических жидких кристаллах (НЖК) впервые были предсказаны в работе [1]. Эти эффекты специфически связаны с неоднородностью распределения директора НЖК и проявляются при наличии градиента температуры в ограниченной НЖК ячейке. В этой работе впервые были записаны тензорные структуры для кинетических потоков и "диссипативная" функция, соответствующая термомеханическим взаимодействиям. Вариацией "диссипативной" функции по градиентам скорости получают консервативные термомеханические силы в уравнении Навье-Стокса. А вариацией по градиентам температуры получается вектор дополнительного термомеханического теплового потока. Наконец, вклад термомеханического эффекта в "силу", действующую на директор, получается варьированием "диссипативной" функции по временной производной директора. В соответствии с этим могут реализовываться три вида термомеханических эффектов. Прямой термомеханический эффект – это возникновение гидродинамических потоков за счет градиента температуры. Обратный термомеханический эффект – это возникновение перепада температуры в неоднородном потоке. И наконец, эффект термомеханической переориентации – это дополнительное отклонение директора под действием потока тепла.

Вскоре после работы [1] появилась работа [2], в которой было высказано сомнение относительно предсказанных термомеханических членов. В [2] "диссипативная" функция принималась за истинную диссипацию энергии и выражалось удивление, что она не инвариантна относительно обращения времени. Тем не менее в работе [2] были выписаны выражения для тензора термомеханических напряжений и вектора теплового потока, отличающиеся от выражений из работы [1] лишь тензорным видом. Более того, авторы работы [2] все эти выражения выписали без объяснений и выводов. Кроме того, тензорные коэффициенты в указанных двух выражениях в [2] были выбраны одинаковыми без приведения каких-либо доказательств. Конечно, записанная в [1] функция не является истинно диссипативной функцией, и термомеханические силы не диссипативны, а консервативны. Но метод, предложенный в [1], является лишь искусственным математическим методом для получения правильных уравнений, естественно совпадающих с уравнениями, выписанными авторами работы [2].

Правильность предсказанных в [1] прямых термомеханических эффектов была подтверждена также многочисленными экспериментальными исследованиями [3-5].

Целью настоящей работы является теоретическое исследование обратного термомеханического эффекта в гибридно-ориентированном НЖК.

2. Куэттовское течение в гибридно-ориентированном НЖК

Рассмотрим горизонтальный слой $0 \leq z \leq L$ гибридно-ориентированного НЖК. На нижней подложке ($z=0$) ячейки НЖК задано гомеотропное граничное условие (единичный вектор в преимущественном направлении молекул — директор $\mathbf{n}(z=0)=\mathbf{e}_z$), а на верхней подложке ($z=L$) задано планарное условие ($\mathbf{n}(z=L)=\mathbf{e}_x$). Тогда распределение директора в объеме ячейки с удовлетворительной точностью можно записать в виде

$$n_x = \sin \theta(z), \quad n_y = 0, \quad n_z = \cos \theta(z); \quad \theta(z) = \pi z / 2L, \quad (1)$$

где θ — угол между директором и осью z . Пусть нижняя подложка ячейки неподвижна, а верхняя — перемещается в направлении оси x со скоростью V_L . В результате в ячейке НЖК возникает гидродинамический поток (куэттовское течение [6]), скорость которого в том же приближении будем принимать равной $\mathbf{v} = \mathbf{e}_x v_x(z)$. Величина $v_x(z)$ определяется стационарным уравнением Навье-Стокса:

$$[2\eta_2 + 2(\eta_1 - \eta_2)\sin^2 \theta + \frac{1}{2}\alpha_1 \sin^2(2\theta)] \frac{d^2 v}{dz^2} + \frac{\pi}{2} [2(\eta_1 - \eta_2)\sin(2\theta) + \alpha_1 \sin(4\theta)] \frac{dv}{dz} = 0. \quad (2)$$

Здесь $V = v_x / V_L$, $Z = z / L$, $\alpha_1, \dots, \alpha_6$ – коэффициенты Лесли, а η_1 и η_2 – коэффициенты вязкости Мессовича: $\eta_1 = 0.5(\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_6)$, $\eta_2 = 0.5(\alpha_4 + \alpha_5 - \alpha_2)$. Граничные условия для скорости имеют вид

$$V(0) = 0, \quad V(1) = 1. \quad (3)$$

Уравнение (2) с граничными условиями (3) решаем численно для НЖК МББА ($\alpha_1 = 6.5 \cdot 10^{-2}$ П, $\eta_1 = 23.8 \cdot 10^{-2}$ П, $\eta_2 = 103.5 \cdot 10^{-2}$ П). Как видно из рис.1, распределение скорости по глубине ячейки существенно отличается от случая изотропной жидкости (пунктирная прямая линия).

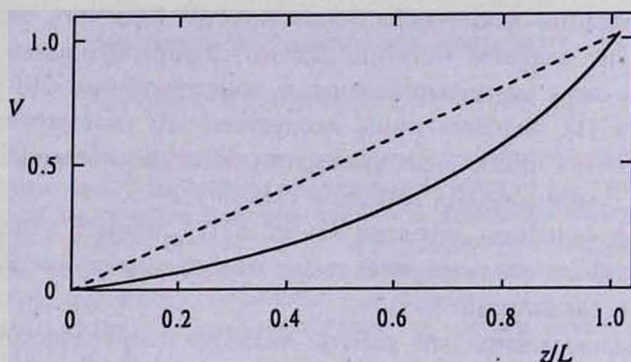


Рис.1. Распределение нормированной скорости по глубине ячейки. Пунктирная линия соответствует случаю изотропной жидкости, а сплошная линия – НЖК МББА.

3. Термомеханическое перераспределение температуры

Сущность обратного термомеханического эффекта заключается в том, что в присутствии неоднородного распределения директора куэтовское течение приводит к термомеханическому тепловому потоку q^{TM} . Последний, в свою очередь, приводит к перепаду температуры на стенках ячейки. Этот процесс продолжается до тех пор, пока термодинамический тепловой поток не скомпенсируется с термомеханическим. С учетом однородности задачи в плоскости ячейки (x, y), стационарное уравнение температуропроводности принимает вид

$$\frac{dq_z^{TM}}{dZ} + \frac{dq_z^T}{dZ} = 0, \quad (4)$$

$$q_z^T = -\frac{1}{L} (\kappa_{\parallel} \cos^2 \theta + \kappa_{\perp} \sin^2 \theta) \frac{dT}{dZ},$$

$$q_z^{TM} = -\frac{\pi}{8} \xi \frac{V_L}{L^2} \frac{dV}{dZ} \left(3 - 9 \sin^2 \theta - \frac{1}{2} \sin^2(2\theta) - 3 \cos^4 \theta \right) T,$$

где $\kappa_{\parallel}$ и $\kappa_{\perp}$ — коэффициенты теплопроводности в направлениях, соответственно, параллельном и перпендикулярном директору, ξ — термомеханический коэффициент.

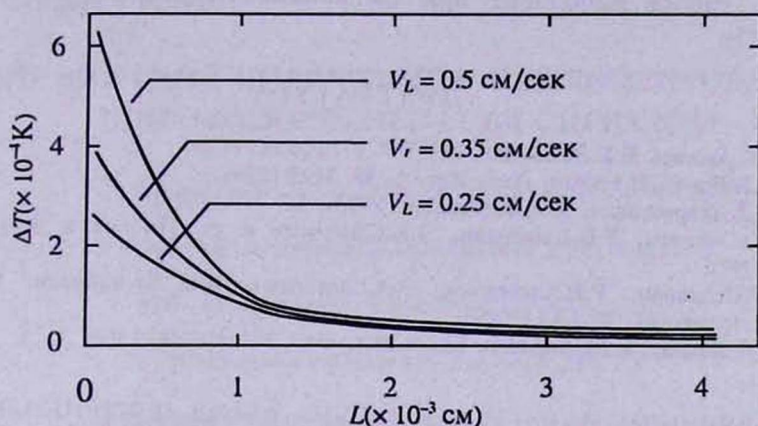


Рис.2. Зависимость перепада температуры от толщины ячейки.

Рассмотрим теперь граничные условия для температуры. На границе $z = L$ поддерживаем постоянную температуру ($T(Z=L) = T_0$), а на границе $z = 0$ отсутствует теплоотвод ($dT/dZ = 0$). Численное решение уравнения (4) проведем для НЖК МББА с параметрами $\kappa_{\parallel} = 6 \cdot 10^3$ эрг/см·с·град, $\kappa_{\perp} = 4 \cdot 10^3$ эрг/см·с·град, $\xi = 5 \cdot 10^{-7}$ эрг/см·град. Как видно из рис.2, перепад температуры имеет примерно обратно-пропорциональную зависимость от толщины ячейки и прямо-пропорциональную зависимость от сдвиговой скорости верхней подложки. Что касается распределения температуры по глубине ячейки (по z -координате), то ее вид близок к параболическому.

4. Обсуждение

Таким образом, в нематическом жидком кристалле с неоднородным распределением директора неоднородный гидродинамический поток приводит к перераспределению тепловой энергии. Конкретно, в гибридной ячейке эффект проявляется в перепаде температуры на подложках ячейки. Заметим, что если для наблюдения эффекта взять НЖК ячейки с малой толщиной $L \sim 10^{-4}$ см, то обратный термомеханический эффект должен привести к возникновению скачка температуры $\Delta T \sim 6 \cdot 10^{-4}$ К при перепаде скорости $V_L \sim 0.5$ см/с. Такое значение ΔT представляется вполне разумным с точки зрения возможностей экспериментального обнаружения. Заметим, что значение скорости V_L мы взяли таким, чтобы при данной толщине еще не развивалась ориентационная неустойчивость течения Куэтта в нематике. Простые оценки показывают также, что повышение температуры среды из-за диссипации

энергии в вязком потоке при указанных значениях параметров оказывается в $10^2 - 10^3$ раз меньше, чем перепад температуры из-за обратного термомеханического эффекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS (грант 97-1672).

ЛИТЕРАТУРА

1. Р.С.Акопян, Б.Я.Зельдович. ЖЭТФ, 87, 1660 (1984).
2. H.R.Brand, H.Pleiner. Phys. Rev. A, 35, 3122 (1987).
3. О.Д.Лаврентович, Ю.А.Насташин. УФЖ, 32, 710 (1987).
4. Р.С.Акопян, Р.Б.Алавердян, Э.А.Сантросян и др. Письма в ЖТФ, 23, 77 (1997).
5. Р.С.Акопян, Р.Б.Алавердян, Э.А.Сантросян, Ю.С.Чилингарян. Квантовая электроника, 30, 653 (2000).
6. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Гидродинамика. М., Наука, 1986.

ՀԱՎԱԴԱՐՁ ԹԵՐՄՈՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ԷՖԵԿՏ ՀԻԲՐԻԴԱՅՆՈՐԵՆ ԿՈՂԱՆՈՐՈՇՎԱԾ ՆԵՍԱՏԻԿ ՀԵՂՈՒԿ ԲՅՈՒՐԵՐՈՒՄ

Ռ.Ս. ՀԱՎՈՐՅԱՆ, Հ.Ե. ՍԵՖԵՐՅԱՆ, Գ.Լ. ԵՍԱՅԱՆ

Տեսականորեն դիտարկված է հակադարձ թերմոմեխանիկական էֆեկտը հիբրիդայնորեն կողմնորոշված մեմատիկ հեղուկ բյուրեղում: Երևույթի էությունը կայանում է նրանում, որ հեղուկ բյուրեղական բջջի պատերին առաջանում է ջերմաստիճանների տարբերություն անհամասեռ հիդրոդինամիկական հոսքի պատճառով, որի ուղղությունը ընկած է մոլեկուլների կողմնորոշման հարթության մեջ և ուղղահայաց է առաջացող ջերմաստիճանային գրադիենտին: Երբ բջջի հաստությունը $\approx 10^{-4}$ սմ է, իսկ հիդրոդինամիկական հոսքի արագությունը 10^{-1} սմ/վ, ջերմաստիճանների տարբերությունը կազմում է $\approx 10^{-3}$ K:

INVERSE THERMOMECHANICAL EFFECT IN A HYBRIDLY ALIGNED NEMATIC LIQUID CRYSTAL

R.S. AKOPYAN, H.YE. SEFERYAN, G.L. YESAYAN

The inverse thermomechanical effect in a hybridly aligned nematic liquid crystal is considered theoretically. The essence of this effect is the onset of temperature difference between the substrates of the nematic cell due to inhomogeneous hydrodynamic fluxes in the plane of the molecule orientation and perpendicular to the direction of arising temperature gradient. In the case when the cell thickness is about 10^{-4} cm and the hydrodynamic flow velocity is $\sim 10^{-1}$ cm/s, the temperature difference is about 10^{-3} K.