УДК 621.372

КОНВЕКЦИЯ В ОТНОСИТЕЛЬНО ТОНКИХ СЛОЯХ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Р.Б. АЛАВЕРДЯН, А.М. ГРИГОРЯН, Ю.С. ЧИЛИНГАРЯН

Ереванский государственный университет, Армения

(Поступила в редакцию 27 июля 2007 г.)

Экспериментально исследованы лазерно-индуцированные конвективные движения в тонких слоях нематических жидких кристаллов (< 1 мм). Показано, что конвекция, формирующаяся при наличии вертикального градиента температуры, имеет тороидальную форму. Измерены скорости конвекционного движения жидкого кристалла при двух различных сечениях падающего лазерного пучка. Проведено сравнение порога градиента температуры конвективных движений, исходя из теоретических расчетов и экспериментальных параметров.

1. Введение

Как известно, конвекционные движения в жидкостях при вертикальном или горизонтальном градиенте температуры довольно хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально. В частности, в работах [1-5] исследована конвекция жидкости при вертикальном температурном градиенте, при котором появляются ячеистые структуры. Это объясняется неустойчивостями в неоднородно прогретой жидкости. При этом надо заметить, что в данных работах объём исследованных жидкостей был намного больше объемов конвективных ячеек.

В работах [1-3] проанализированы три различных механизма создания конвективных движений – силы плавучести, силы поверхностного натяжения и термоэлектрические силы. При некотором критическом значении нагрева включается какой-либо из механизмов конвективного движения. Какой именно механизм включается первым, в основном зависит от характерных размеров объема жидкости. В более толстых слоях (больше 1 мм) возникают ячейки Бенара, в слоях потоньше (меньше 1 мм) – ячейки Марангони, а в самых тонких (меньше 100 мкм) – первым включается термоэлектрический механизм.

Также, в работе [1] исследованы изменения соотношений продольного и поперечного размеров ячейки конвекции при плавном изменении толщины жидкого слоя. Показано, что резкое изменение соотношения размеров ячейки конвекции происходит из-за смены механизма возбуждения конвекции. Как можно было ожидать, в случае тонких слоёв вместо сил плавучести доминантными становятся термокапиллярные силы, а при уменьшении толщины они сменяются термоэлектрическими силами. В работе проведены теоретические расчеты, которые сравниваются с классическими экспериментальными результатами Бенара [4]. При этом в [4] эксперименты проводились с воском, слой которого имел толщину до 1 мм

и помещался на гладкий металлический поддон.

Принимая во внимание приведенную в работе [5] формулу зависимости градиента температуры, при котором наблюдается гидродинамическая конвекция, от параметров жидкого кристалла, можно оценить величину мощности лазерного излучения, достаточную для создания гидродинамических конвекций.

В настоящей работе мы экспериментально исследовали возбуждение гидродинамических конвекций в тонких (< 1 мм) неориентированных слоях НЖК, обусловленное поглощением лазерного излучения с гауссовским распределением интенсивности. В результате поглощения лазерного излучения создается вертикальный градиент температуры, который в свою очередь возбуждает тороидальное конвективное движение.

2. Экспериментальные результаты

В эксперименте были использованы горизонтально установленные ячейки с НЖК Е7 (рис.1). Ячейка НЖК представляет из себя две плоские стеклянные подложки (3), разделенные спейсерами (2), между которыми находится НЖК (1). Ячейка НЖК была установлена между скрещенными поляризаторами и освещена снизу сфокусированным, нормально падающим гауссовым лазерным пучком. В нашем эксперименте использовался непрерывный YAG:Nd³⁺ лазер, имеющий длину волны $\lambda = 1,06$ мкм. Ячейка НЖК снизу освещалась лампой, свет от которой регистрировался камерой, подключенной к компьютеру. Тем самым фиксировался весь процесс развития гидродинамических движений.

Визуализация гидродинамических движений проводилась путем добавления в НЖК алюминиевого порошка, размеры частиц которого составляли порядка 3 мкм, с весовой концентрацией 10⁻³%. Оптическое поглощение данного комплекса $\beta \approx 10^2$ см⁻¹ на $\lambda = 1,06$ мкм. Скорость гидродинамических движений НЖК определялась как скорость движения алюминиевых частиц.

Эксперимент состоял в следующем: в горизонтально установленной ячейке НЖК посредством лазерного излучения создавался вертикальный градиент температуры, обусловленный поглощением лазерного излучения в ячейке НЖК. Далее, вертикальный градиент температуры создавал гидродинамические движения, которые приводили к смене распределения директора НЖК. С помощью камеры было зафиксировано, что эти гидродинамические движения имеют тороидальную структуру, вследствие чего распределение директора НЖК также имеет соответствующую структуру. Это было подтверждено наблюдениями с применением скрещенных поляризаторов.



Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 – НЖК, 2 – спейсеры ячейки НЖК, 3 – подложки ячейки НЖК, 4 – фокусирующая линза, 5 – фильтр, поглощающий ИК излучение, 6 – ССД-камера, 7 – компьютер, 8 – лазер, 9 – скрещенные поляризаторы, 10 – лампа подсветки.

Эксперименты проводились с тремя ячейками, имеющими разные толщины НЖК слоя, и для каждой были измерены зависимости максимальной радиальной скорости тороидальной волны от мощности падающего лазерного излучения, при двух разных размерах пучка падающего лазерного излучения.



Рис.2. Зависимость максимальной радиальной скорости тороидальной волны от мощности падающего лазерного излучения, при сечении падающего лазерного излучения 200 мкм для трех разных толщин слоя НЖК (530 мкм, 650 мкм, 800



Рис.3. Зависимость максимальной радиальной скорости тороидальной волны от мощности падающего лазерного излучения, при сечении падающего лазерного излучения 1 мм для трех разных толщин слоя НЖК (530 мкм, 650 мкм, 800 мкм).

На рис.2,3 приведены зависимости максимальной радиальной скорости тороидальной волны от мощности падающего лазерного излучения, при разных толщинах слоя НЖК и для двух разных значений сечений падающего лазерного излучения. Видно, что скорость монотонно возрастает с ростом мощности падающего излучения.

3. Теоретическая оценка

Для оценки необходимого для возникновения конвективных движений градиента температуры в используемых в эксперименте ячейках НЖК можно воспользоваться результатами работы [6]. В ней приведена формула зависимости градиента температуры ΔT , при котором наблюдается гидродинамическая конвекция, от параметров жидкого кристалла. Воспользуемся тремя безразмерными параметрами, характеризующими свойства гидродинамических движений [6]. Это число Прандтля

$$\sigma = \frac{\alpha_4 / 2}{\rho k_{\parallel}} , \qquad (1)$$

отношение времени релаксации директора к времени тепловой диффузии

$$F = \frac{(\alpha_4 / 2)k_{\parallel}}{k_{33}},$$
 (2)

и число Рэлея

$$R = \frac{\theta g \rho d^3 \Delta T}{(\alpha_4 / 2) k_{\parallel}}.$$
(3)

В этих уравнениях α_4 – один из коэффициентов вязкости, θ – коэффициент изобарного теплового расширения, k_{\parallel} – коэффициент тепловой диффузии, параллельной директору

мкм).

НЖК, k_{33} – одна из констант упругости НЖК, ρ – плотность НЖК, d – толщина слоя НЖК и g – гравитационное ускорение.

Время установки гидродинамического движения рассчитывается согласно следующей формуле:

$$t_{\rm v} = d^2 / k_{\rm H} \,. \tag{4}$$

Параметры *F*, σ и t_v можно считать фиксированными для определенного типа НЖК, в определенном температурном интервале. Для НЖК Е7 при 25(С (при котором и проводился эксперимент) эти параметры имеют следующие значения: $\sigma \approx 200$, $R \approx 3000$ и $F \approx 400$. Время t_v имеет порядкок нескольких минут и зависит от толщины слоя НЖК. Рассчитывая значения *R*, можно оценить величину ΔT для данной толщины слоя НЖК. При такой оценке значение ΔT получается порядка нескольких °С.

С другой стороны, ΔT можно оценить, пользуясь формулой из работы [7]

$$\Delta T = \frac{1}{\phi} \frac{\beta}{\psi^2 \rho C_p} I e^{-\alpha d}, \qquad (5)$$

где ф – коэффициент тепловой диффузии, β – коэффициент поглощения, ρ – плотность НЖК, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, ψ – общий коэффициент потерь, I – интенсивность лазерного излучения, d – толщина слоя (размеры ячейки НЖК).

Оценивая значение ΔT в условиях эксперимента, при размере лазерного пучка 1 мм: $I \approx 300 \text{ Вт/см}^2$, $\beta \approx 10^2 \text{ см}^{-1}$, $\psi \approx 10^4 \text{ см}^{-1}$, $e^{-\alpha z} \approx 1$, $\phi \approx 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$, $\rho C_p \approx 1 \text{ Дж/см}^3$ град⁵, получим $\Delta T \approx 3^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, видно, что градиент температуры, оцененный с помощью параметров эксперимента, и его теоретическая оценка имеют тот же порядок. Это позволяет предположить, что наблюдаемые конвективные движения объясняются существующей теорией.

4. Обсуждение и выводы

В данной работе экспериментально исследованы конвективные движения в относительно тонких слоях нематических жидких кристаллов с закрытой поверхностью. Выявлен тип конвекции, возникающий при вертикальном градиенте температуры, который является тороидальным. Измерены также скорости конвекционного движения жидкого кристалла при двух разных сечениях падающего лазерного пучка. Измерения показали, что при увеличении интенсивности падающего излучения скорости гидродинамической конвекции монотонно растут, тогда как в открытых ячейках с такими же толщинами слоя НЖК наблюдалось уменьшение скорости гидродинамической конвекции (см. [5]). Уменьшение скорости объясняется сложным характером деформации поверхности НЖК. В настоящей работе эксперименты проводились с закрытой ячейкой НЖК, чем и обусловлено монотонное возрастание скоростей.

Проведено сравнение значений возбуждаемого градиента температуры, полученного из теории гидродинамической конвекции (3) и из прямых измерений интенсивности

лазерного излучения (5). Полученное соответствие позволяет предположить, что выявленные конвективные движения объясняются в рамках существующей теории.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. **Е.Д.Эйдельман.** ЖТФ, **68**, 11 (1998).
- 2. A.Arakelyan, Yu.Chilingaryan, R.Alaverdyan. J. de Phys., 50, 1393 (1989).
- 3. **Е.Д.Эйдельман.** СОЖ, **5**, 94 (2000).
- 4. H.Benard. Ann. Chem. Phys., 23, 62 (1901).
- 5. Р.С.Акопян, Р.Б.Алавердян, А.Г.Аракелян, С.Ц.Нерсисян, Ю.С.Чилингарян. Квантовая электроника, **34**, 267 (2004).
- 6. L.Thomas, W.Pesch, G.Ahlers. Phys. Rev. E, 58, 5885 (1998).
- 7. Р.Б.Алавердян, С.М.Аракелян, Ю.С.Чилингарян. Письма в ЖЭТФ, 42, 366 (1983).

ԿՈՆՎԵԿՏԻՎ ՇԱՐԺՈՒՄՆԵՐԸ ՀԵՂՈՒԿ ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏԱԲԱՐ ԲԱՐԱԿ ՇԵՐՏԵՐՈՒՄ

Ռ.Բ. ԱԼԱՎԵՐԴՅԱՆ, Ա.Մ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Յու.Ս. ՉԻԼԻՆԳԱՐՅԱՆ

Փորձնականորեն ուսումնասիրված են լազերով մակածված կոնվեկտիվ շարժումները նեմատիկ հեղուկ բյուրեղի բարակ շերտերում (≤1մմ)։ Ցույց է տրված, որ ուղղահայաց ջերմաստիձանային գրադիենտի դեպքում առաջացող կոնվեկցիան կրում է տորոիդալ բնույթ։ Չափված են կոնվեկտիվ շարժումների արագությունները, ընկնող լազերային փնջի երկու տարբեր հատույթների դեպքում։ Կատարված է կոնվեկտիվ շարժումների շեմային ջերմաստիձանային գրադիենտների համեմատություն՝ ելնելով տեսական հաշվարկներից և փորձի պարամետրերից։

CONVECTION IN RELATIVELY THIN LAYERS OF NEMATIC LIQUID CRYSTALS

R.B. ALAVERDYAN, A.M. GRIGORYAN, Yu.S. CHILINGARYAN

The laser-induced convective motion in nematic liquid crystal thin layers (≤ 1 mm) is investigated experimentally. It is shown that the convection formed at the vertical temperature gradient has a toroidal form. Convective motion velocities were measured at two different diameters of the incident laser beam. A comparison of the convective movement temperature gradient thresholds is carried out, using theoretical estimations and experimental parameters.