

СТАЦИОНАРНЫЕ РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГИДРОДИНАМИКЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Е. Н. Кожевников

Самарский государственный университет,
enkozhevnikov@yandex.ru

«Классическая» гидродинамика нематической среды строится в предположении медленных временных изменений ориентации директора \mathbf{n} и постоянства ориентационной упорядоченности, описываемой традиционно параметром $\xi = \frac{1}{2} \langle 3L_1^2 - 1 \rangle$ (здесь L_1 - проекция на ось кристалла единичного вектора \vec{L} , определяющего ориентацию длинных осей молекул). При низкочастотной деформации кристалла параметр упорядоченности остается постоянным, но меняется направление \vec{n} . Учет этих изменений позволяет, оставаясь в рамках гидродинамики, описывать деформацию ориентационной структуры кристалла в гидродинамических потоках и описывать структурные переходы в жидкокристаллических слоях, как в стационарных потоках, так и при их периодической деформации. Быстрое сжатие среды в звуковых волнах меняет параметр ориентационной упорядоченности. В линейном приближении релаксация ξ в звуковом поле обуславливает вязкоупругий характер реакции и среды на сжатие и, как следствие, приводит к анизотропии и дисперсии коэффициента поглощения и скорости звука. Для уточнения акустических свойств нематического кристалла расширяют спектр релаксирующих параметров. В описании этих эффектов на высоких, ультразвуковых частотах в свою очередь пренебрегают изменением ориентации оси кристалла. И в том и в другом случаях эффекты, обусловленные вращением директора и релаксацией ориентационной упорядоченности считаются несвязанными. Нелинейные эффекты традиционно присутствуют в уравнениях гидродинамики в виде конвективных напряжений $\sigma_{ij}^{(c)} = \rho v_i v_j$, напряжений вида $\delta\sigma_{ij} = \alpha_m v_{ik} n_k \delta n_j$, и моментов $\delta\vec{\Gamma} = \gamma v_i \partial_i \vec{n}$. Здесь \vec{n} - директор, определяющий ориентацию нематического жидкого кристалла, α_m, γ - комбинации коэффициентов вязкости Лесли, считающиеся постоянными.

Вместе с тем при интерференции звуковых и вязких волн одной частоты меняется как параметр ξ , так и направление директора \vec{n} . На частотах, сопоставимых с обратным временем релаксации τ параметра ξ , эти процессы приводят к перекрестным эффектам, в результате которых в тензоре напряжений появляется слагаемое $\delta\sigma_{ij}^{(r)}$, содержащее стационарную часть. Напряжения $\delta\sigma_{ij}^{(r)}$ несимметричны по перестановке индексов, исчезают в пределе малых времен τ и, следовательно, имеют релаксационную природу. Несимметричная часть напряжений обуславливает появление стационарных моментов. В данной работе предлагается расчет стационарных напряжений и моментов в нематическом жидком кристалле в интерферирующих звуковых и вязких волнах. Расчет строится на основе молекулярной модели кристалла, в которой каждая из молекул рассматривается как вытянутое тело с длинной осью \vec{L} , окруженная сплошной жидкой средой. Силовое взаимодействие молекул трактуется, как самосогласованное поле с потенциалом взаимодействия Майера–Заупе $E = -d \langle P_2(L_1) \rangle P_2(L_1)$, где $P_2(L_1)$ – полиномы Лежандра, L_1 - проекция вектора \vec{L} на ось кристалла, $d \approx 4.5T_c$ - постоянная поля, T_c - температура ориентационного

плавления; скобки указывают на усреднение по ориентациям молекул. На основе феноменологических рассуждений строится выражение для стационарных напряжений, учитывающих перекрестные эффекты релаксации структуры и вращения оси кристалла

$$\delta\sigma_{ij}^{(r)} = -\frac{1}{2}nb \int \overline{f(\vec{L})} [(a_5 - a_2)v_{i,k}L_kL_j + (a_5 + a_2)v_{k,i}L_kL_j + (a_6 - a_5)v_{j,k}L_kL_i + (a_6 + a_5)v_{k,j}L_kL_i + 2a_1v_{pq}L_pL_qL_iL_j] d\vec{L}$$

Здесь $f(\vec{L})$ - неравновесная плотность углового распределения, a_k - кинетические коэффициенты, n - число частиц в единице объема, b - вращательная подвижность молекул. Черта сверху означает усреднение по периоду колебаний в звуковых и вязких волнах. Неравновесная плотность распределения отвечает уравнению неразрывности в виде

$$\frac{\partial f(\vec{L})}{\partial t} + \overline{G}_i \left\{ f(\vec{L}) \left[-b\overline{G}_i (E + T \ln f(\vec{L})) + \omega_{ij}L_j + \lambda(v_{ij}L_j - v_{jk}L_jL_kL_i) \right] \right\} = 0,$$

где $\overline{G}_i = \partial/\partial L_i - L_iL_k \partial/\partial L_k$ - угловой оператор Гамильтона в координатном представлении, ω_{ij} - тензор вращения, λ - формфактор молекул среды.

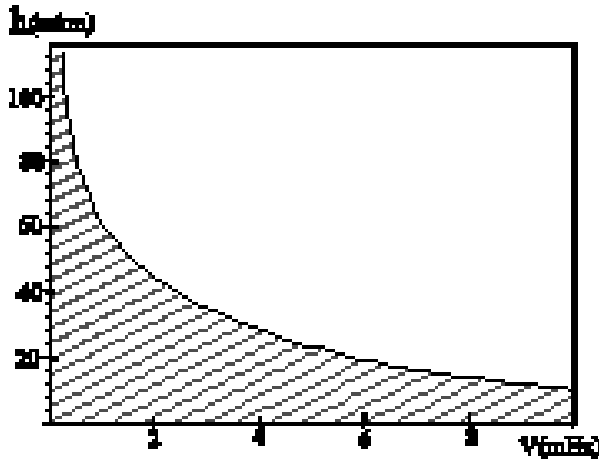
Расчет релаксационных напряжений и моментов проводится методом возмущений. Полученные выражения громоздки, поэтому приведем главное слагаемое для напряжений на частоте воздействия ω

$$\delta\sigma_{ij}^{(r)} \approx 3nd R_{22} \langle P_2 \rangle \beta_S^{-1} \frac{1}{T_c} \frac{\partial T_c}{\partial P} \frac{\omega\tau^2}{1 + \omega^2\tau^2} \overline{u_{kk}v_{i,m}n_m n_j}$$

где $R_{22} = \langle (P_2 - \langle P_2 \rangle)^2 \rangle$, β_S - адиабатическая сжимаемость среды.

Несимметричная часть напряжений определяет стационарные моменты, действующие на молекулы среды. Объемная плотность моментов равна $\delta\Gamma_i = \varepsilon_{ijk} \sigma_{jk}$.

Стационарные релаксационные напряжения могут быть доминирующими в



генерации акустических потоков в среде и совместно со стационарными моментами определять деформацию жидкокристаллической структуры в звуковом поле. Их роль демонстрируется на примере расчета акустических потоков, возникающих в НЖК - слое при одновременном воздействии на него сжатия и вязких волн одной и той же частоты $\nu = \omega/2\pi$. Показано, что формирование потоков для разных частот и толщин слоя h обусловлено действием разных механизмов. В области низких частот и малых толщин слоя

определяющий вклад в формирование потоков вносят стационарные релаксационные напряжения; с повышением частоты и толщины слоя ответственность за формирование потоков переходит к конвективным напряжениям. Зоны ответственности этих механизмов на плоскости ν, h , рассчитанные для параметров жидкого кристалла МБА, приведены на рисунке. Заштрихованная область на графике соответствует значениям ν, h , при которых преобладающим механизмом формирования потоков является действие стационарных релаксационных напряжений и моментов.