



ISSN: 2658–5782

Номер 3

Июль–Сентябрь 2020

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Динамика дислокаций в доменной структуре нематического жидкого кристалла¹

Делев В.А.

Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа

Исследуются динамика и взаимодействие классических дислокаций в доменной структуре закрученного на $\pi/2$ нематического жидкого кристалла. Особенностью закрученных нематиков является то, что гидродинамические потоки в доменах Вильямса, наряду с тангенциальной компонентой скорости, имеют и аксиальную составляющую, направление которой противоположно в соседних доменах. Дислокации могут двигаться как перпендикулярно (*glide*) доменам Вильямса, так и вдоль (*climb*) них. Установлено, что при столкновении дислокаций с противоположными топологическими зарядами $S = \pm 1$ при заданном напряжении их скорость увеличивается на расстояниях, порядка пространственного периода доменной решетки. Показано, что динамика и взаимодействие дислокаций с топологическими зарядами $S = \pm 1$ качественно хорошо описываются возмущенным уравнением синус-Гордона.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, доменная структура, дислокация, кинк, уравнение синус-Гордона

1. Введение

Образование и разрушение надмолекулярного порядка в неравновесных системах, как правило, сопровождается появлением дефектов [1]. Поэтому изучение свойств дефектов при структурообразовании и возникновении турбулентности является одной из важных задач физики конденсированного состояния. С другой стороны, возможность управления не только количеством дефектов, но и их взаимодействием при изменении внешнего воздействия позволяет использовать экспериментальные данные для верификации, например, $(1+1)$ -мерных моделей. В этом отношении дефекты, возникающие в доменных структурах нематических жидких кристаллов (НЖК), являются уникальными объектами для экспериментального изучения их динамических характеристик. Важную роль при этом играет исходная ориентация поля директора \mathbf{n} , характеризующая преимущественное направление молекул в пространстве, так как имен-

но она задает симметрию доменных структур и их дефектов [2–4]. Таким образом, динамика дефектов в доменных структурах существенным образом зависит не только от амплитуды приложенного напряжения, но и от исходной конфигурации поля директора \mathbf{n} .

Изучению дефектов в доменных структурах НЖК посвящен ряд работ [5–8]. Результаты этих работ свидетельствуют о важной роли дефектов при усложнении пространственно-временной динамики доменных структур с увеличением приложенного напряжения. В частности, установлено, что наиболее общими механизмами при формировании двумерных структур являются процессы рождения и аннигиляции дислокаций.

Типичными элементарными дефектами электроконвективных структур в НЖК являются дислокации с топологическими зарядами $S = \pm 1$. Дефект с топологическим зарядом $S = \pm 1$ соответствует скачку фазы на $\pm 2\pi$ в структуре доменов Вильямса, т.е. его сингулярность определяется лишним (или недостающим) пространственным периодом при обходе замкнутого контура вокруг его ядра [8]. Поведение дислокаций в приближе-

¹Работа выполнена в рамках госзадания № АААА-А19-119022290052-9.

нии слабой надкритичности хорошо описывается уравнением Гинзбурга–Ландау [6–8].

Другой подход для описания динамики дислокаций в жидких кристаллах [9, 10] основан на глубокой аналогии свойств и поведения дефектов с моделью Френкеля–Конторовой (ФК) [11, 12]. Если в стандартной модели пренебречь эффектами дискретности, то получится хорошо известное уравнение синус-Гордона (УСГ). Данное уравнение было одним из первых обнаруженных уравнений с многосолитонным решением, а первое приложение УСГ нашло в физике для построения упрощенных моделей дислокаций.

Несмотря на большое количество теоретических работ, прямые экспериментальные исследования приложений модели ФК для кристаллов все еще достаточно редки (см. ссылки в [12]). Тем не менее, модель ФК с успехом использовалась, в частности, в теории сверхпроводников для описания эффекта Джозефсона [15, 16], динамики доменных границ в ферроэлектриках [17] и ферромагнетиках [18], а также структуры адсорбированных слоев на поверхности кристаллов [19, 20]. О возможности наблюдения резонансной динамики кинков УСГ в системе с одиночной точечной примесью с учетом генерации локализованных волн сообщается в [21]. С этой точки зрения перспективным объектом, где топологические дефекты в одномерной системе могут быть легко созданы, а их свойства изучены, являются также НЖК. Так, в [22] впервые сделана попытка применения модели ФК для описания динамического поведения дефектов в закрученных на $\pi/2$ нематиках. В работах [23, 24] для описания взаимодействия дислокаций в линейном протяженном дефекте, возникающем в закрученном НЖК, использовалось невозмущенное УСГ.

В настоящей работе исследуются динамика и взаимодействие краевых дислокаций с противоположными топологическими зарядами $S = \pm 1$ в закрученных НЖК. Дислокации движутся перпендикулярно доменам Вильямса и при взаимодействии аннигилируют. Показано, что такое столкновение дислокаций качественно хорошо описываются возмущенным УСГ.

2. Методика эксперимента

В качестве НЖК использовался 4-n-метоксибензилиден-n-бутиланилин (МББА), который помещался в ЖК-ячейку между двумя стеклянными подложками с проводящим покрытием из SnO_2 . Поверхность подложек с электродами покрывалась слоем ориентанта полиимида AL1254 (JSR Corp. Japan), который затем натирался в одном направлении для создания однородной планарной ориен-

тации директора \mathbf{n} . Толщина ЖК-ячейки размером 16×12 мм задавалась майларовыми прокладками $d \simeq 20$ мкм. После заполнения ячейки нематиком и формирования однородной планарной ориентации верхняя подложка медленно поворачивалась относительно нижней по часовой стрелке на угол $\pi/2$ так, что во всем слое НЖК возникала однородно закрученная ориентация директора \mathbf{n} . К ЖК-слою прикладывалось переменное напряжение U с частотой $f_U = 30$ Гц. Пороговое напряжение возникновения доменов Вильямса составляло $U_c = 5.6$ В. При этом их ось ориентирована перпендикулярно директору \mathbf{n} в середине слоя НЖК и составляет углы -45° и 45° соответственно с ориентацией директора на верхней и нижней подложках. Направления гидродинамических потоков в доменах определялись путем анализа движений пробных частиц диаметром $2 \div 3$ мкм, добавленных в НЖК. Доменные структуры и их дефекты наблюдались в поляризационный микроскоп Axiolab (Zeiss, Germany), а их изображения регистрировались видеокамерой VX44 (PCO Inc., Germany) с разрешением 720×576 пикселей и оцифровывались внешней платой Pinnacle 700-USB (USA).

3. Результаты и обсуждение

Процесс взаимодействия двух дислокаций с противоположными топологическими зарядами $S = \pm 1$ представлен на рис. 1. Заметим, что в модельных представлениях дислокация с $S = +1$ соответствует кинку, а с $S = -1$ — антикинку.

При столкновении кинка и антикинка в невозмущенном УСГ, последние проходят друг через друга без изменения формы, скорости и энергии, т.е. не изменяют своих свойств после взаимодействия, кроме смещения фазы [12]. В нашем случае при столкновении дислокаций с противоположными топологическими зарядами последние аннигилируют, поэтому для описания наблюдаемого процесса используем модель синус-Гордона с диссипативным членом $-\gamma u_t$ [13, 14].

Получение невозмущенного УСГ, описывающего динамику дислокаций, показано в работе [22]. Поскольку размер элементарной ячейки доменной структуры в закрученном на $\pi/2$ НЖК определяется как $T = 2\lambda$ (где λ — ширина одного линейного домена), что связано с антипараллельностью аксиальных компонент скорости потока анизотропной жидкости в соседних доменах, то в качестве узла доменной решетки рассматривается центр «двойного домена» вдоль направления x .

УСГ, полученное на основе гамильтониана модели ФК [22] после перехода к

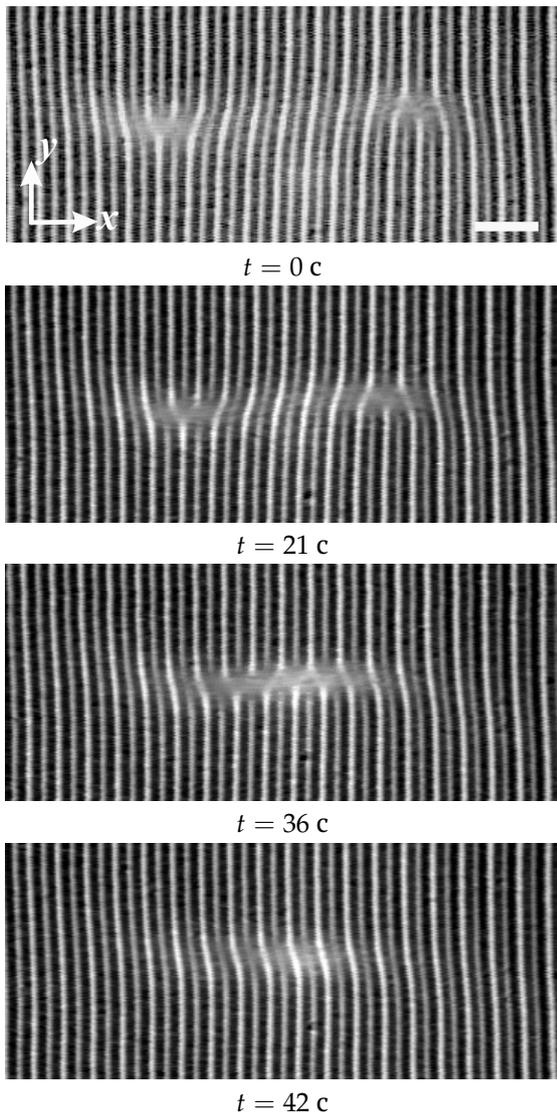


Рис. 1. Процесс столкновения двух дислокаций типа glide с топологическими зарядами $S = -1$ и $S = +1$ при $U = 6$ В и $f = 30$ Гц. Масштаб – 100 мкм

континуальному приближению:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial \tau^2} - \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} + \sin \eta = 0, \quad (1)$$

где $\eta = \pi u / \lambda$ – нормированная функция смещения двойного домена от его равновесного положения вдоль направления x ; $\xi = x / (2\lambda\sqrt{k})$ – нормированная координата; $k = (\lambda/\pi)^2(k'/V_0')$; k' – константа взаимодействия соседних доменов; V_0' – энергия, приходящаяся на единицу длины двойного домена; $\tau = (\pi/\lambda)\sqrt{V_0'/m'}t$ – нормированное время; $m' = m/l$ – удельная масса двойного домена; l –

длина двойного домена.

Как известно, УСГ (1) имеет ряд аналитических решений [25]. Одно из них, называемое кинком (антикинком), представляет дислокацию в модели ФК:

$$\eta = 4 \arctan \left[\exp \left(\sigma \frac{\xi - \xi_0 + v(\tau - \tau_0)}{\sqrt{1 - v^2}} \right) \right],$$

где $\sigma = \pm 1$ – топологический заряд кинка; $0 \leq v \leq 1$ – скорость движения кинка; величина ξ_0 – характеризует положение кинка в момент времени $\tau = \tau_0$.

Рассмотрим движение кинков с противоположными топологическими зарядами навстречу друг к другу. В нашем случае слева имеем антикинок, а справа – кинк. В численных расчетах использовалось экспериментально полученное значение безразмерной скорости движения дислокаций $v = 0.3$, представляющее собой отношение абсолютной скорости движения дислокаций, отдаленных друг от друга на достаточное расстояние к скорости движения вблизи точки их столкновения (порядка пространственного периода доменной решетки).

Численная иллюстрация столкновения антикинка и кинка показана на рис. 2.

Таким образом в данной работе показано, что столкновение дислокаций с противоположными топологическими зарядами в электроконвективной структуре НЖК хорошо описывается двумя независимыми решениями возмущенного УСГ в виде кинков с $\sigma = -1$ и $\sigma = +1$, движущихся навстречу друг другу.

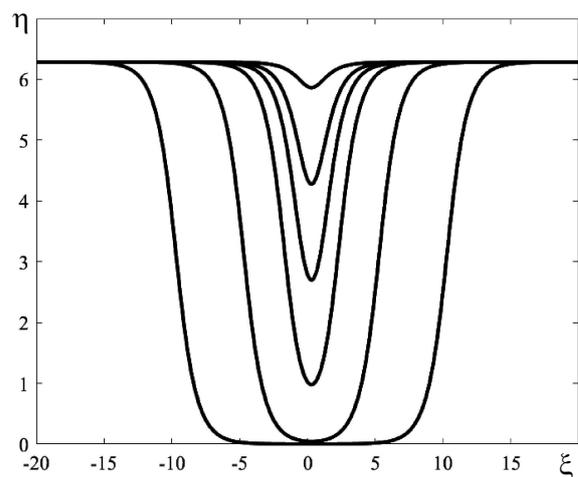


Рис. 2. Теоретические зависимости столкновения кинков с топологическими зарядами $\sigma = -1$ и $\sigma = +1$ в различные моменты времени при наличии диссипативного возмущения $-\gamma u_t$, $\gamma = 0.25$

4. Заключение

В настоящей работе экспериментально и теоретически изучены динамика и взаимодействие двух дислокаций с противоположными топологическими зарядами $S = \pm 1$, возникающих в доменной структуре закрученного на $\pi/2$ НЖК. Показана принципиальная возможность описания их динамики и взаимодействия в рамках возмущенного УСГ.

Следует отметить, что дефекты доменной решетки, возникающие в НЖК во внешних электрических полях, наряду с дислокациями в кристаллах, доменными границами в сегнетоэлектриках и магнетиках, являются новым примером реалистических нелинейных физических систем, для которых применение нелинейных моделей и учет локализованных возмущений решетки представляется вполне успешным [22–24]. Важным преимуществом системы электроконвекции в НЖК, по сравнению с другими, является относительная простота управления структурой и симметрией доменной решетки посредством изменения частоты и величины внешнего электрического поля, приложенного к ЖК-слою (толщиной $d \sim 10 - 100$ мкм). Использование прозрачных электродов в ЖК-ячейке позволяет легко визуализировать эту систему конвективных доменов и возникающие в ней дефекты. Кроме того, имеются апробированные способы создания неоднородных слоев НЖК (закрученных и/или гомеопланарных), что увеличивает разнообразие типов и симметрий наблюдаемых доменных структур, а также их дефектов. Всё это делает данную систему электроконвекции в НЖК перспективным объектом приложения классической модели ФК и ее обобщений.

В экспериментальных исследованиях использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Спектр» ИФМК УФИЦ РАН и Регионального центра коллективного пользования «Агидель».

Список литературы

- [1] Cross M.C., Hohenberg P.C. Pattern formation outside of equilibrium // *Reviews of Modern Physics*. 1993. V. 65. P. 851–1112.
DOI: [10.1103/RevModPhys.65.851](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.65.851)
- [2] Пикин С.А. Структурные превращения в жидких кристаллах. М.: Наука, 1981. 336 с.
- [3] De Gennes P.G. and Prost J. *The Physics of Liquid Crystals*. Oxford: Clarendon, 1994. 596 p.
- [4] Buka A. and Kramer L. (editors). *Pattern Formation in Liquid Crystals*. N.Y.: Springer-Verlag, 1996. 339 p.
- [5] Kai S., Chizumi N., and Kohno M. Pattern formation, defect motions and onset of defect chaos in the electrohydrodynamic instability of nematic liquid crystals // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1989. V. 58. Pp. 3541–3554.
DOI: [10.1143/JPSJ.58.3541](https://doi.org/10.1143/JPSJ.58.3541)
- [6] Rasenat S., Steinberg V., and Rehberg I. Experimental studies of defect dynamics and interaction in electrohydrodynamic convection // *Physical Review A*. 1990. V. 42, No. 10. Pp. 5998–6008.
DOI: [10.1103/PhysRevA.42.5998](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.42.5998)
- [7] Bodenschatz E., Weber A., and Kramer L. Interaction and dynamics of defects in convective roll patterns of anisotropic fluids // *Journal of Statistical Physics* 1991. V. 64, No. 5. Pp. 1007–1015.
DOI: [10.1007/BF01048810](https://doi.org/10.1007/BF01048810)
- [8] Joets A. and Ribotta R. Localized bifurcations and defect instabilities in the convection of a nematic liquid crystal // *Journal of Statistical Physics* 1991. V. 64, No. 5/6. Pp. 981–1005.
DOI: [10.1007/BF01048809](https://doi.org/10.1007/BF01048809)
- [9] Lowe M. and Gollub J.P. Solitons and the commensurate-incommensurate transition in a convecting nematic fluid // *Physical Review A*. 1985. V. 31, No. 6. Pp. 3893–3897.
DOI: [10.1103/PhysRevA.31.3893](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.31.3893)
- [10] Lam L. and Prost J. (editors). *Solitons in Liquid Crystals*. N.Y.: Springer Science & Business Media, 1992. 335 p.
- [11] Френкель Я.И., Конторова Т.А. К теории пластической деформации // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. 1938. Ч. I. Т. 8, Вып. 1. С. 89–95.
- [12] Браун О.М., Кившарь Ю.С. Модель Френкеля-Конторовой. Концепции, методы, приложения. М.: Физматлит, 2008. 536 с.
- [13] Kivshar Yu.S., Malomed B.A. Dynamics of solitons in nearly integrable systems // *Rev. Mod. Phys.* 1989. V. 61, No. 4. Pp. 763–915.
DOI: [10.1103/RevModPhys.61.763](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.61.763)
- [14] Malomed B.A. Inelastic interactions of solitons in nearly integrable systems. II // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1985. V. 15, No 3. Pp. 385–401.
DOI: [10.1016/S0167-2789\(85\)80006-3](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(85)80006-3)
- [15] Ustinov A.V., Cirillo M., Malomed B.A. Fluxon dynamics in one-dimensional Josephson-junction arrays // *Physical Review B*. 1993. V. 47, No. 13. Pp. 8357–8360.
DOI: [10.1103/PhysRevB.47.8357](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.47.8357)
- [16] Van der Zant H.S.J., Orlando T.P., Watanabe S., Strogatz S.H. Kink propagation in a highly discrete system: observation of phase locking to linear waves // *Physical Review Letters*. 1995. V. 74. Pp. 174–177.
DOI: [10.1103/PhysRevLett.74.174](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.174)
- [17] Cowley R.A., Axe J.D., Iizumi M. Neutron scattering from the ferroelectric fluctuations and domain walls of lead germanate // *Physical Review Letters*. 1976. V. 36. Pp. 806–809.
DOI: [10.1103/PhysRevLett.36.806](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.806)
- [18] A.R. Bishop, W.F. Lewis. A theory of intrinsic coercivity in narrow magnetic domain wall materials // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. 1979. V. 12, No. 18. Pp. 3811–3825.
DOI: [10.1088/0022-3719/12/18/027](https://doi.org/10.1088/0022-3719/12/18/027)
- [19] Люксютов И.Ф., Наумовец А.Г., Покровский В.Л. Двумерные кристаллы. Киев: Наукова Думка, 1988. 218 с.
- [20] De la Figuera J., Pohl K., de la Fuente R.O., Schmid A.K., Bartelt N.C., Carter C.B., and Hwang R.Q. Direct observation of misfit dislocation glide on surfaces // *Physical Review Letters*. 2001. V. 86, No. 17. Pp. 3819–3822.
DOI: [10.1103/PhysRevLett.86.3819](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.3819)
- [21] Екомасов Е.Г., Гумеров А.М., Кудрявцев Р.В. О возможности наблюдения резонансного взаимодействия кинков уравнения синус-Гордона с локализованными волнами в реальных физических системах // *Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. 2015. Т. 101, Вып. 12. С. 935–939.
eLIBRARY ID: [23864373](https://elibrary.ru/23864373)

- [22] Чувывров А.Н., Скалдин О.А., Делев В.А., Лебедев Ю.А., Батыршин Э.С. Структура и динамика дислокаций Френкеля-Конторовой при электроконвекции в жидких кристаллах // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2006. Т. 130, № 6. С. 1072–1081.
[eLIBRARY ID: 9430706](#)
- [23] Делев В.А., Скалдин О.А., Батыршин Э.С., Назаров В.Н., Екомасов Е.Г. Кинк-антикинк взаимодействие в линейном дефекте электроконвективной структуры нематика // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2019. Т. 109, Вып. 2. С. 84–88.
[DOI: 10.1134/S0370274X19020036](#)
- [24] Делев В.А., Назаров В.Н., Скалдин О.А., Батыршин Э.С., Екомасов Е.Г. Сложная динамика каскада кинк-антикинковых взаимодействий в линейном дефекте электроконвективной структуры нематика // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2019. Т. 110, 607–613 (2019).
[DOI: 10.1134/S0370274X19210070](#)
- [25] Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. М.: Мир, 1988. 694 с.



Dynamics of dislocations in the domain structure of the nematic liquid crystal

Delev V.A.

Institute of Molecule and Crystal Physics UFRC RAS, Ufa

Dynamics and interaction of classical dislocations in the domain structure of $\pi/2$ nematic liquid crystal is studied. A feature of twisted nematics is that hydrodynamic flows in Williams domains, together with the tangential component of velocity, also have an axial component, the direction of which is opposite in neighboring domains. Dislocations can move both perpendicular (*glide*) to Williams domains, and along (*climb*) them. It was found that when dislocations collide with opposite topological charges $S = \pm 1$ at given voltage, their speed increases. It has been shown that dynamics and interaction of dislocations with topological charges $S = \pm 1$ are qualitatively well described by the perturbed sine-Gordon equation.

Keywords: nematic liquid crystal, domain structure, dislocation, kink, sine-Gordon equation

References

- [1] Cross M.C., Hohenberg P.C. Pattern formation outside of equilibrium // *Reviews of Modern Physics*. 1993. V. 65. P. 851–1112. DOI: 10.1103/RevModPhys.65.851
- [2] Pikin S.A. Strukturnye prevrashcheniya v zhidkikh kristallah. M.: Nauka, 1981. 336 s. (In Russian)
- [3] De Gennes P.G. and Prost J. *The Physics of Liquid Crystals*. Oxford: Clarendon, 1994. 596 p.
- [4] Buka A. and Kramer L. (editors). *Pattern Formation in Liquid Crystals*. N.Y.: Springer-Verlag, 1996. 339 p.
- [5] Kai S., Chizumi N., and Kohno M. Pattern formation, defect motions and onset of defect chaos in the electrohydrodynamic instability of nematic liquid crystals // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1989. V. 58. Pp. 3541–3554. DOI: 10.1143/JPSJ.58.3541
- [6] Rasenat S., Steinberg V., and Rehberg I. Experimental studies of defect dynamics and interaction in electrohydrodynamic convection // *Physical Review A*. 1990. V. 42, No. 10. Pp. 5998–6008. DOI: 10.1103/PhysRevA.42.5998
- [7] Bodenschatz E., Weber A., and Kramer L. Interaction and dynamics of defects in convective roll patterns of anisotropic fluids // *Journal of Statistical Physics* 1991. V. 64, No. 5. Pp. 1007–1015. DOI: 10.1007/BF01048810
- [8] Joets A. and Ribotta R. Localized bifurcations and defect instabilities in the convection of a nematic liquid crystal // *Journal of Statistical Physics* 1991. V. 64, No. 5/6. Pp. 981–1005. DOI: 10.1007/BF01048809
- [9] Lowe M. and Gollub J.P. Solitons and the commensurate-incommensurate transition in a convecting nematic fluid // *Physical Review A*. 1985. V. 31, No. 6. Pp. 3893–3897. DOI: 10.1103/PhysRevA.31.3893
- [10] Lam L. and Prost J. (editors). *Solitons in Liquid Crystals*. N.Y.: Springer Science & Business Media, 1992. 335 p.
- [11] Frenkel' YA.I., Kontorova T.A. K teorii plasticheskoy deformatsii // *Zhurnal Eksperimental'noj i Teoreticheskoy Fiziki*. 1938. CH. I. T. 8., Vyp. 1. S. 89–95. (In Russian)
- [12] Braun O.M., Kivshar' YU.S. Model' Frenkelya-Kontorovoj. Konceptii, metody, prilozheniya. M.: Fizmatlit, 2008. 536 s. (In Russian)
- [13] Kivshar Yu.S., Malomed B.A. Dynamics of solitons in nearly integrable systems // *Rev. Mod. Phys.* 1989. V. 61, No. 4. Pp. 763–915. DOI: 10.1103/RevModPhys.61.763
- [14] Malomed B.A. Inelastic interactions of solitons in nearly integrable systems. II // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1985. V. 15, No 3. Pp. 385–401. DOI: 10.1016/S0167-2789(85)80006-3
- [15] Ustinov A.V., Cirillo M., Malomed B.A. Fluxon dynamics in one-dimensional Josephson-junction arrays // *Physical Review B*. 1993. V. 47, No. 13. Pp. 8357–8360. DOI: 10.1103/PhysRevB.47.8357
- [16] Van der Zant H.S.J., Orlando T.P., Watanabe S., Strogatz S.H. Kink propagation in a highly discrete system: observation of phase locking to linear waves // *Physical Review Letters*. 1995. V. 74. Pp. 174–177. DOI: 10.1103/PhysRevLett.74.174
- [17] Cowley R.A., Axe J.D., Iizumi M. Neutron scattering from the ferroelectric fluctuations and domain walls of lead germanate // *Physical Review Letters*. 1976. V. 36. Pp. 806–809. DOI: 10.1103/PhysRevLett.36.806

- [18] A.R. Bishop, W.F. Lewis. A theory of intrinsic coercivity in narrow magnetic domain wall materials // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. 1979. V. 12, No. 18. Pp. 3811–3825.
DOI: [10.1088/0022-3719/12/18/027](https://doi.org/10.1088/0022-3719/12/18/027)
- [19] Lyuksyutov I.F., Naumovec A.G., Pokrovskij V.L. Dvumernye kristally. Kiev: Naukova Dumka, 1988. 218 s. (In Russian)
- [20] De la Figuera J., Pohl K., de la Fuente R.O., Schmid A.K., Bartelt N.C., Carter C.B., and Hwang R.Q. Direct observation of misfit dislocation glide on surfaces // *Physical Review Letters*. 2001. V. 86, No. 17. Pp. 3819–3822.
DOI: [10.1103/PhysRevLett.86.3819](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.3819)
- [21] Ekomasov E.G., Gumerov A.M., Kudryavcev R.V. O Vozmozhnosti nablyudeniya rezonansnogo vzaimodejstviya kinkov uravneniya sinus-Gordona s lokalizovannymi volnami v real'nyh fizicheskikh sistemah // *Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noj i Teoreticheskoy Fiziki*. 2015. T. 101, Vyp. 12. S. 935–939. (In Russian)
eLIBRARY ID: [23864373](https://elibrary.ru/23864373)
- [22] CHuvyrov A.N., Skaldin O.A., Delev V.A., Lebedev YU.A., Batyrshin E.S. Struktura i dinamika dislokacij Frenkelya-Kontorovoj pri elektrokonvekcii v zhidkikh kristallah // *Zhurnal Eksperimental'noj i Teoreticheskoy Fiziki*. 2006. T. 130, № 6. S. 1072–1081. (In Russian)
eLIBRARY ID: [9430706](https://elibrary.ru/9430706)
- [23] Delev V.A., Skaldin O.A., Batyrshin E.S., Nazarov V.N., Ekomasov E.G. Kink-antikink vzaimodejstvie v linejnom defekte elektrokonvektivnoj struktury nematika // *Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noj i Teoreticheskoy Fiziki*. 2019. T. 109, Vyp. 2. S. 84–88. (In Russian)
DOI: [10.1134/S0370274X19020036](https://doi.org/10.1134/S0370274X19020036)
- [24] Delev V.A., Nazarov V.N., Skaldin O.A., Batyrshin E.S., Ekomasov E.G. Slozhnaya dinamika kaskada kink-antikinkovyh vzaimodejstvij v linejnom defekte elektrokonvektivnoj struktury nematika // *Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noj i Teoreticheskoy Fiziki*. 2019. T. 110, 607–613. (In Russian)
DOI: [10.1134/S0370274X19210070](https://doi.org/10.1134/S0370274X19210070)
- [25] Dodd R., Ejlbek Dzh., Gibbon Dzh., Morris H. Solitony i nelinejnye volnovye uravneniya. M.: Mir, 1988. 694 s. (In Russian)