

УДК 544.72

## ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ, РЕГУЛИРУЕМАЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

© 2020 г. Ю. И. Диканский<sup>1</sup>, А. Р. Закинян<sup>1</sup>, \*, В. Д. Мкртчян<sup>1</sup>, Г. Х. Усманов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северо-Кавказский федеральный университет,  
ул. Пушкина, 1, Ставрополь, 355017 Россия

\*e-mail: zakinyan.a.r@mail.ru

Поступила в редакцию 24.01.2020 г.

После доработки 19.03.2020 г.

Принята к публикации 25.03.2020 г.

В работе впервые рассмотрено влияние магнитного поля на закономерности фотоиндуцированной термокапиллярной деформации свободной поверхности слоя магнитной жидкости. Деформация возникает в результате локального нагрева поверхности подающим на нее лучом лазера и проявляется в искривлении профиля поверхности жидкости. Отраженный от деформированной поверхности луч лазера демонстрирует неоднородное пространственное распределение интенсивности излучения в форме концентрических колец. Внешнее магнитное поле дополнительно влияет на форму свободной поверхности магнитной жидкости, благодаря чему оказывается возможным регулировать проявление фотоиндуцированной термокапиллярной деформации. В работе экспериментально изучены геометрические характеристики и эволюция во времени интерференционной картины термокапиллярного отклика в зависимости от величины и ориентации магнитного поля.

DOI: 10.31857/S0023291220050043

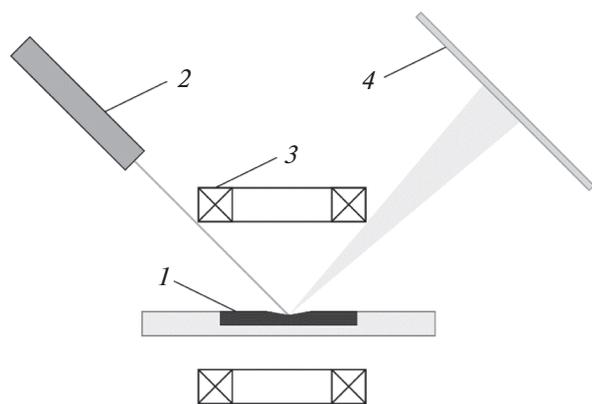
### ВВЕДЕНИЕ

При неоднородном нагреве наблюдается деформация свободной поверхности тонкого слоя жидкости [1–4]. Одной из причин этого эффекта является зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры. Так, в случае локального нагрева сверху тонкого слоя со свободной верхней границей, расположенного на твердой горизонтальной подложке, на поверхности жидкости возникает градиент поверхностного натяжения. При этом касательные напряжения, направленные радиально от точки нагрева, формируют поток жидкости, который направлен в области с меньшей температурой. Поверхностные слои жидкости за счет вязкого трения увлекают ее объем, в результате чего в слое жидкости развивается термокапиллярная конвекция. Эти локальные конвективные течения и приводят к изменению профиля свободной поверхности жидкости. Такой локальный нагрев можно осуществить, воздействуя на поверхность слоя жидкости лазерным излучением [5–8]. При этом отраженный от деформированной поверхности пучок лазера при проецировании его на экран формирует так называемый термокапиллярной отклик, по геометрии которого можно судить о закономерностях термокапиллярной деформации

поверхности слоя жидкости. Рассматриваемое явление, также известное как термооптическое зеркало, находит применение в ряде методов, позволяющих проводить измерения вязкости жидкости, тепло- и температуропроводности материала подложки, оценивать концентрацию ПАВ в жидкости и др. [9, 10].

Надо заметить, что разработка эффективных термооптических сред в настоящее время представляет значительный интерес в контексте фундаментальных исследований и прикладных разработок. В этой связи привлекает внимание применение наноматериалов в исследованиях такого рода, в которых наночастицы или кластеры играют значительную роль в термооптическом поведении объема или поверхности материала [11, 12].

В последнее время был проведен ряд исследований термооптических явлений в магнитных жидкостях, характеризующихся высокой степенью поглощения излучения. Эти исследования касались изучения эффектов лазерно-индуцированной тепловой линзы, самофокусировки излучения [13, 14], а также пространственной модуляции концентрации коллоидных частиц [15]. Специфической особенностью применения магнитных жидкостей в термооптических исследованиях является возможность регулирования свето-

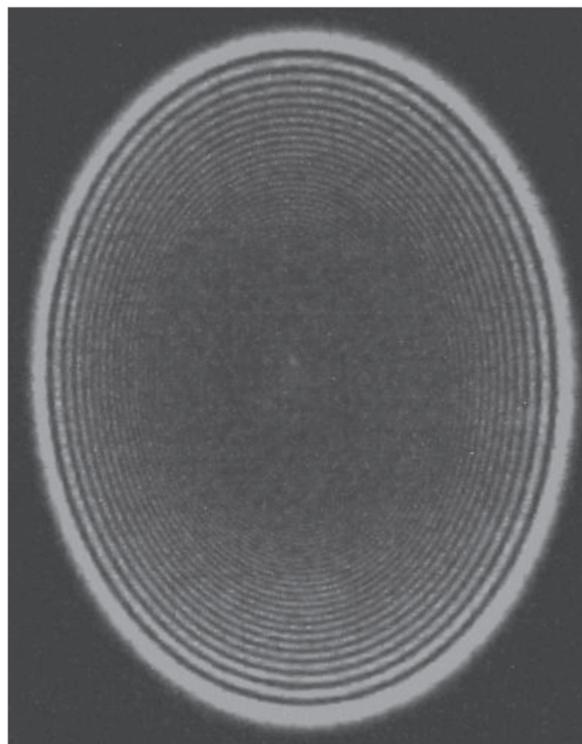


**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – слой магнитной жидкости на подложке, 2 – гелий-неоновый лазер, 3 – катушки Гельмгольца, 4 – экран.

вого потока при помощи магнитного поля, что дает дополнительные средства для изучения фундаментальных закономерностей рассматриваемых явлений, а также открывает новые перспективы их практического использования. Эффект термооптического зеркала также ранее был обнаружен в магнитных жидкостях [16], однако влияние дополнительно приложенного магнитного поля на его закономерности не рассматривалось. Данная работа призвана заполнить этот пробел. В ней впервые исследуется влияние внешнего магнитного поля на закономерности термокапиллярной деформации поверхности магнитной жидкости, индуцированной локальным лазерным нагревом.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Схема применявшейся установки изображена на рис. 1. На твердую горизонтальную стеклянную подложку наносился слой магнитной жидкости 1 толщиной 130 мкм. Магнитная жидкость представляла собой дисперсию наночастиц магнетита средним размером 10 нм в полидиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-3, стабилизированную олеиновой кислотой. Плотность магнитной жидкости составляла  $1380 \text{ кг/м}^3$ , концентрация магнитной фазы – 7.7%, начальная магнитная восприимчивость – 1, удельная теплопроводность –  $0.134 \text{ Вт/(м К)}$  при  $30^\circ\text{C}$ , динамическая вязкость –  $20 \text{ мПа с}$ . Локальный нагрев производился пучком гелий-неонового лазера 2 мощностью 15 мВт и диаметром 0.5 мм, который направлялся под углом  $45^\circ$  на поверхность слоя магнитной жидкости. Отраженный луч попадал на экран 4, на котором формировалась картина термокапиллярного отклика, фиксируемая при помощи видеокамеры. Экран располагался перпендикулярно отраженному лучу на расстоянии 2 м от точки



**Рис. 2.** Характерная картина термокапиллярного отклика при отражении луча лазера от поверхности слоя магнитной жидкости.

падения луча на поверхность жидкости. При этом слой магнитной жидкости помещался в стационарное однородное магнитное поле, создаваемое катушками Гельмгольца 3. В опытах магнитное поле могло быть ориентировано перпендикулярно слою жидкости, а также параллельно ему, в последнем случае поле могло лежать в плоскости распространения лазерного луча, а также в перпендикулярной лучу плоскости.

Путем наблюдений с использованием тепловизора было установлено, что температура поверхности слоя жидкости в точке падения лазерного луча возрастает примерно на 3 градуса по сравнению с окружающими участками поверхности жидкости. Было обнаружено, что картина формирующегося термокапиллярного отклика представляет собой серию концентрических колец эллиптической формы (рис. 2). Данная картина аналогична по своему внешнему виду той, что наблюдалась в предшествующих исследованиях фотоиндуцированной термокапиллярной деформации поверхности слоя жидкости.

Для уточнения физического механизма наблюдаемых эффектов были проведены наблюдения течений термокапиллярной конвекции, возникающих в результате локального лазерного нагрева поверхности слоя магнитной жидкости. Для этого в жидкость были добавлены микрочастицы

алюминиевой пудры, и при помощи оптического микроскопа осуществлялось наблюдение за характером их движения. Оказалось, что частицы алюминия приходят в движение в окрестности падения луча лазера, поднимаясь из нижних областей слоя к поверхности и далее расходясь радиально от места падения лазерного луча. Это демонстрирует картину течений, характерную для термокапиллярной конвекции. В качестве примера на рис. 3 изображены траектории частиц алюминиевой пудры, полученные на основе сделанных наблюдений при помощи MosaicSuite в составе пакета Fiji.

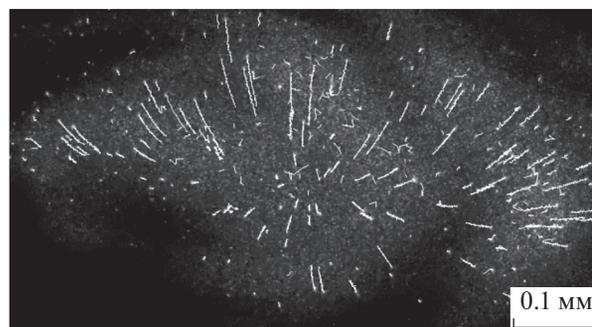


Рис. 3. Траектории алюминиевых микрочастиц в области падения луча лазера на поверхность слоя магнитной жидкости, демонстрирующие картину формирующегося течения жидкости.

Воздействие магнитного поля приводило к изменению размеров и формы термокапиллярного отклика. Так, на рис. 4 показан график зависимости величин большой,  $a$ , и малой,  $b$ , полуосей внешнего светлого кольца картины стационарного термокапиллярного отклика от напряженности внешнего магнитного поля, направленного перпендикулярно слою магнитной жидкости. Видно, что с ростом напряженности величины полуосей растут. Геометрическая форма картины при этом остается неизменной.

При действии поля, направленного параллельно слою магнитной жидкости, уменьшается величин полуосей термокапиллярного отклика (рис. 5, 6). В этом случае происходит также изменение геометрической формы колец. Так, магнитное поле, лежащее в плоскости распространения лазерного луча, приводит к тому, что форма эллиптических колец становится более вытянутой. Если же поле перпендикулярно лучу, имеет место уменьшение степени вытянутости эллипсоидальных колец, что приводит при некоторой величине напряженности к тому, что картина приобретает форму круговых колец, а при дальнейшем росте напряженности поля происходит смена направления деформации картины.

Изменение формы картины стационарного термокапиллярного отклика в описанных случаях иллюстрирует рис. 7, на котором приведены графики зависимостей отношения полуосей внешнего светлого кольца от напряженности магнитного поля при трех различных его ориентациях.

Была также рассмотрена динамика эволюции картины термокапиллярного отклика. В качестве иллюстрации на рис. 8 изображены зависимости величины большой полуоси внешнего светлого кольца картины от времени, полученные при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля, а также при разных его ориентациях. Начальному моменту времени на графиках соответствует момент включения лазера.

Полученные данные позволяют определить время установления стационарной картины термокапиллярного отклика в зависимости от действия магнитного поля. Так, на рис. 9 представлены

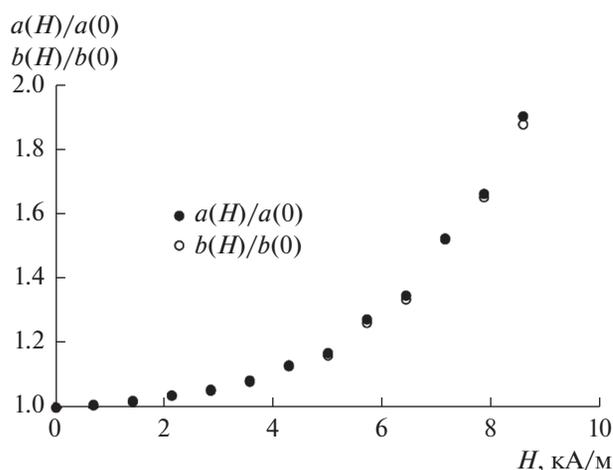


Рис. 4. Зависимость относительных величин большой ( $a$ ) и малой ( $b$ ) полуосей внешнего светлого кольца стационарной картины термокапиллярного отклика от напряженности внешнего магнитного поля. Поле направлено перпендикулярно слою магнитной жидкости.

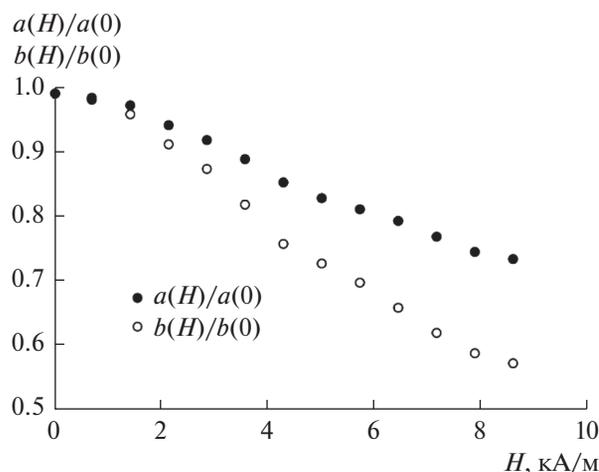
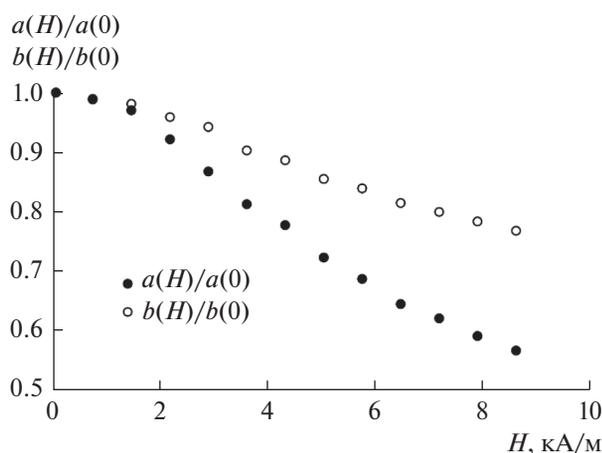


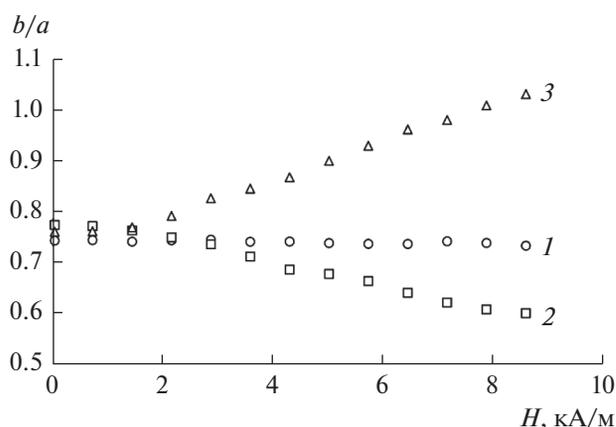
Рис. 5. То же, что на рис. 4, для случая, когда магнитное поле параллельно слою магнитной жидкости и лежит в плоскости распространения луча лазера.



**Рис. 6.** То же, что на рис. 4, для случая, когда магнитное поле параллельно слою магнитной жидкости и лежит в плоскости, перпендикулярной лучу лазера.

зависимости времени развития картины термокапиллярного отклика от напряженности внешнего магнитного поля. Как видно из рисунка, действие перпендикулярного слою жидкости магнитного поля приводит к возрастанию времени развития деформации поверхности. Действие же касательного к поверхности жидкости поля, напротив, уменьшает время формирования устойчивого профиля поверхности. В последнем случае ориентация магнитного поля относительно плоскости распространения лазерного луча существенной роли не играет.

Представляет интерес также релаксация поверхности жидкости после прекращения действия лазерного излучения. Для изучения закономерностей эволюции поверхности жидкости после снятия возмущающего воздействия лазерного излучения применялся дополнительный лазер низкой мощности, луч которого направлялся в ту же точку поверхности жидкости, что и луч основного лазера. При этом излучение дополнительного лазера не вызывало возмущений поверхности жидкости, и его луч распространялся в плоскости, отличной от плоскости распространения луча основного лазера. При одновременном воздействии обоих лазерных пучков, луч дополнительного лазера, отражаясь от поверхности магнитной жидкости, также демонстрировал интерференционную картину в виде светлых и темных колец на экране. По эволюции этой картины после отключения основного лазера можно судить о процессе релаксации поверхности жидкости. Так, путем измерения времени стягивания в точку интерференционной картины, образованной дополнительным лазером, было определено время релаксации термокапиллярной деформации поверхности слоя магнитной жидкости в зависимости от действия внешнего магнитного поля.



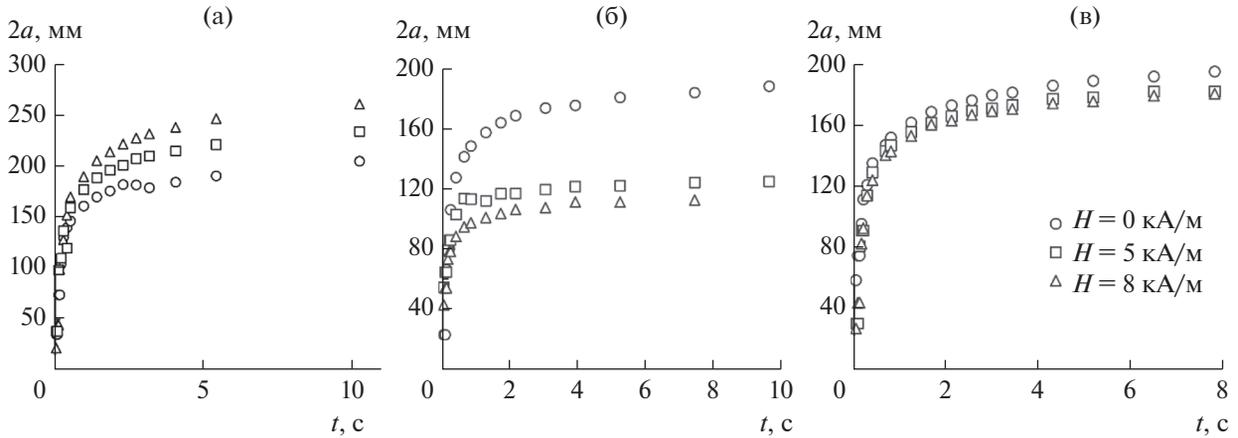
**Рис. 7.** Зависимость отношения полуосей внешнего светлого кольца стационарной картины термокапиллярного отклика от напряженности внешнего магнитного поля: 1 – поле направлено перпендикулярно слою магнитной жидкости, 2 – поле параллельно слою магнитной жидкости и лежит в плоскости распространения луча лазера, 3 – поле параллельно слою магнитной жидкости и лежит в плоскости, перпендикулярной лучу лазера.

Соответствующие экспериментальные зависимости представлены на рис. 10.

Как следует из рис. 10, действие перпендикулярного слою магнитного поля приводит к возрастанию времени релаксации деформации поверхности. Действие же касательного к поверхности жидкости поля при малых величинах напряженности также приводит к росту времени релаксации, однако дальнейшее увеличение напряженности поля проявляется в уменьшении времени релаксации. При этом эффект изменения времени релаксации под действием поля сильнее выражен в случае, когда магнитное поле параллельно плоскости распространения луча лазера.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как уже отмечалось, локальный нагрев поверхности слоя жидкости в рассматриваемой ситуации приводит к развитию термокапиллярной конвекции, что проявляется в изменении профиля жидкости. Падение на поверхность жидкости луча лазера, в частности, проявляется в образовании в месте падения углубления, при отражении от стенок которого и формируется картина термокапиллярного отклика. Наличие магнитных свойств у жидкости приводит к возможности влияния на данные процессы внешнего магнитного поля. Задача об устойчивости слоя магнитной жидкости при неоднородном нагреве в однородном магнитном поле ранее была теоретически рассмотрена в [17]. В частности, было отмечено,



**Рис. 8.** Зависимость от времени величины большой полуоси внешнего светлого кольца картины термокапиллярного отклика при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля. Поле направлено перпендикулярно слою магнитной жидкости (а), параллельно этому слою и лежит в плоскости распространения луча лазера (б), параллельно этому слою и лежит в плоскости, перпендикулярной лучу лазера (в).

что в качестве определяющих поведение системы безразмерных параметров можно рассмотреть следующие величины, характеризующие относительный вклад различных сил:

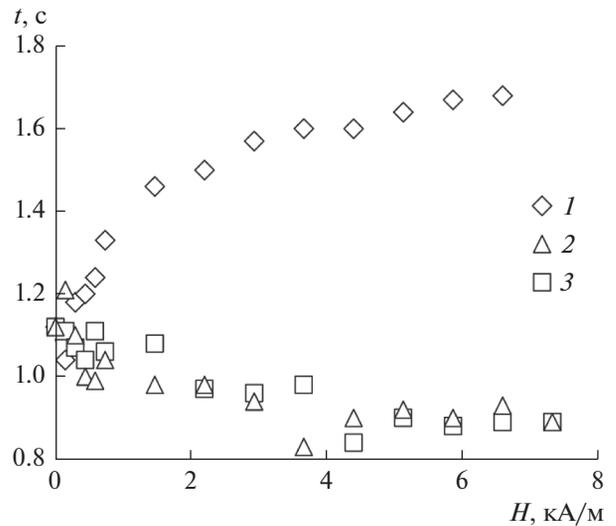
$$Ma = \frac{\beta_\alpha \gamma l^2}{\eta \kappa}, \quad Gr = \frac{\beta_\rho g \gamma l^4}{\nu^2}, \quad Ra = \frac{\nu}{\kappa} Gr,$$

$$D = \frac{\mu_0 K^2 \gamma^2 l^4}{\rho \nu^2 (1 + \chi)}, \quad Si = \frac{\mu_0 M_n^2}{\sqrt{\rho g \alpha}},$$

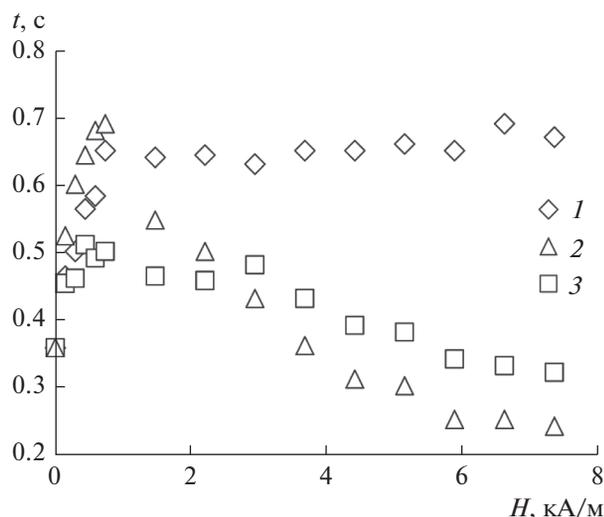
где  $\gamma$  – градиент температуры,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости,  $\kappa$  – коэффициент температуропроводности,  $\beta_\alpha = -\partial\alpha/\partial T$ ,  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\beta_\rho = -1/\rho(\partial\rho/\partial T)$ ,  $\rho$  – плотность,  $l$  – характерный размер системы,  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $K = -(\partial M/\partial T)_H$ ,  $M$  – намагниченность,  $\chi$  – магнитная восприимчивость.

Не все из перечисленных физических величин известны точно применительно к условиям описанных выше экспериментов, однако, подставляя приближенные значения, характерные для подобных систем, можно показать, что величины безразмерных параметров оказываются в следующем соотношении  $Ma > Si \gg Gr, Ra, D$ . В частности, критерий Марангони  $Ma$  по порядку величины равен  $10^2$ , что соответствует развитию выраженной термокапиллярной конвекции. При этом эффекты гравитационной конвекции, характеризующиеся числами Грасгофа и Рэлея ( $Gr, Ra$ ), и термомагнитной конвекции (параметр  $D$ ) оказываются пренебрежимо малыми. Критерий магнитостатической устойчивости поверхности магнитной жидкости  $Si$  оказывается малым для того, чтобы можно было ожидать деформацию под

действием только магнитного поля, что соответствует экспериментальным данным. Действительно, приложение магнитного поля в отсутствие лазерного нагрева не приводило к какому-либо изменению геометрии поверхности слоя магнитной жидкости. Однако критерий магнитостатической устойчивости все же существенно превосходит значения соответствующих парамет-



**Рис. 9.** Зависимости времени установления стационарной картины термокапиллярного отклика от напряженности внешнего магнитного поля: 1 – поле направлено перпендикулярно слою магнитной жидкости, 2 – поле параллельно этому слою и лежит в плоскости распространения луча лазера, 3 – поле параллельно этому слою и лежит в плоскости, перпендикулярной лучу лазера.



**Рис. 10.** Зависимости времени релаксации термокапиллярной деформации поверхности магнитной жидкости от напряженности внешнего магнитного поля. Обозначения те же, что на рис. 9.

ров, характеризующих гравитационную и термомагнитную конвекцию.

Можно заключить, что наблюдающиеся в описанных выше экспериментах эффекты возникают при совместном действии термокапиллярной конвекции и магнитоэлектрических сил, то есть в рассматриваемой ситуации имеет место совместное проявление этих двух механизмов деформации поверхности слоя магнитной жидкости. Образующаяся в результате термокапиллярной деформации лунка на поверхности магнитной жидкости приводит к локальному искажению магнитного поля. Если внешнее магнитное поле направлено перпендикулярно поверхности жидкости, то локальная неоднородность поля оказывается таковой, что стимулирует развитие возникшей лунки, и она становится глубже [17, 18]. Это приводит к соответствующему изменению разности хода интерферирующих лучей и проявляется в увеличении размеров наблюдаемой на экране картины отклика. Также результатом увеличения глубины возникающей лунки является рост времени развития и релаксации деформации поверхности. Магнитное поле, ориентированное параллельно поверхности магнитной жидкости, стабилизирует возникающие на ней возмущения и уменьшает глубину лунки, что проявляется в уменьшении размеров картины термокапиллярного отклика. При этом поле также дополнительно деформирует лунку, приводя к ее горизонтальному растяжению вдоль направления поля, что проявляется в изменении формы колец картины термокапиллярного отклика. Уменьшение глуби-

ны лунки также должно приводить к уменьшению времени развития и релаксации деформации. Наблюдающийся на рис. 9 первоначальный рост времени релаксации в параллельном поле при малых величинах напряженности не вполне укладывается в представленную качественную картину явления, его объяснение требует более детального теоретического анализа рассматриваемых процессов и является предметом дальнейших исследований.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально исследовано явление индуцированной локальным лазерным нагревом капиллярной деформации свободной поверхности магнитной жидкости. Продемонстрировано влияние магнитного поля на характеристики термокапиллярного отклика, на основе чего можно сделать вывод о возможности эффективного управления данным термооптическим явлением с помощью магнитного поля. Полученные результаты могут быть полезны, например, при разработке оптических сенсоров и актуаторов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания вузам в сфере научной деятельности (проект № 0795-2020-0030).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hershey A.V.* // Phys. Rev. 1939. V. 56. P. 204.
2. *Безуглый Б.А., Флягин В.М.* // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2007. № 6. С. 124.
3. *Братухин Ю.К., Макаров С.О.* Гидродинамическая устойчивость межфазных поверхностей. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2005.
4. *Пшеничников А.Ф., Токменина Г.А.* // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1983. № 3. С. 150.
5. *Da Costa G., Bentolila F., Ruiz E.* // Phys. Lett. A. 1983. V. 95. P. 313.
6. *Безуглый Б.А., Иванова Н.А., Зуева А.Ю.* // ПМТФ. 2001. Т. 42. С. 130.
7. *Mizev A.I.* // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2004. V. 45. P. 699.
8. *Karlov S.P., Kazenin D.A., Myznikova B.I., Wertgeim I.I.* // J. Non-Equilib. Thermodyn. 2005. V. 30. P. 283.
9. *Sakai K., Mizuno D., Takagi K.* // Phys. Rev. E. 2001. V. 63. 046302.

10. Безуглый Б.А., Чемоданов С.И. // ЖТФ. 2005. Т. 75. С. 136.
11. Liberman V., Robinson P.D., Geurtsen G.P., Tysk S.M., Geis M.W. // Optics Express. 2018. V. 26. P. 9502.
12. Pustovalov V.K., Astafyeva L.G., Fritzsche W. // Nano Energy. 2013. V. 2. P. 1137.
13. Du T., Yuan S., Luo W. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 1844.
14. Pu S., Chen X., Liao W., Chen L., Chen Y., Xia Y. // J. Appl. Phys. 2004. V. 96. P. 5930.
15. Bacri J.-C., Cebers A., Bourdon A., Demouchy G., Heegaard B.M., Perzynski R. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. P. 5032.
16. Zauls V., Liberts G., Shakars J., Cebers A. // SPIE Proc. 1997. V. 2967. P. 260.
17. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989.
18. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989.