

Научная статья

УДК 536.24

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-235-242>

CC BY 4.0

Исследование теплового эффекта на основе наночастиц жидких кристаллов

Резида Гайфулловна Рахматуллина¹ , Нестор Нжийа² , Алексей Анатольевич Русинов³ ,
Альбина Рафитовна Маскова^{3*} 

¹ Казанский государственный аграрный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия

² Казанский федеральный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия

³ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: asunasf@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время активно занимаются разработкой композитных систем, допированных наночастицами и на основе жидкокристаллических (ЖК) сред. Последние, обладая уникальными свойствами, могут применяться для совершенствования различных ЖК-устройств. Для этого очень важно исследовать механизм изменения свойств жидкокристаллических систем от размеров и концентрации наночастиц. В последнее время применяется достаточное количество методов для измерения потока жидкости или газа, основанных на разных физических принципах. Информацию о среднем массовом расходе жидкости или газа позволяет получить метод измерения, основанный на стационарной инжекции тепла в поток. Среднюю скорость потока позволяют измерить электромагнитные и ультразвуковые датчики, а средний объемный расход – гидродинамический (аэродинамический), а также механический турбинный методы. В процессе теплопереноса и массопереноса конвективное движение в жидкой среде играет важную роль в подавляющем большинстве природных явлений и технологических процессов. Многие процессы конвективного массопереноса и теплопереноса в химической, нефтехимической, строительной, атомной и других отраслях промышленности осуществляются в тепловых трубах. До настоящего времени также остается открытым вопрос об эффективности применения тепловых труб с корпусами из композиционных материалов. В представленной работе были поставлены следующие цели: собрать экспериментальную установку для изучения теплового эффекта (потока), провести исследования изменения температуры на поверхности проводника соединения на основе наночастиц жидких кристаллов и вязкости жидких кристаллов от концентрации наночастиц. **Методы и материалы.** В данной экспериментальной работе в области внешней границы проводника действует тепловой поток. Отметим, что на перераспределение теплового поля влияют такие процессы, как теплопроводность и теплоотдача. Для наблюдения теплового эффекта использовались соединения на основе наночастиц жидких кристаллов. Наноструктурные системы жидких кристаллов обладают таким уникальным свойством, как текучесть, присущим обычным жидкостям. Для непрозрачных стенок проводника предложен способ определения направления теплового потока. Ранее проведенные экспериментальные исследования показали, что измерение температуры возможно только пирометрическим методом. Поэтому перераспределение изменения температуры на поверхности потока проводника зафиксировано с помощью оптического пирометра, воспринимающего тепловое (инфракрасное) излучение. В данной работе в качестве основы использовалось соединение на основе наночастиц жидких кристаллов, а именно с добавлением холестерилолеата. **Результаты и обсуждение.** В ходе исследования экспериментально получены зависимости температуры в зоне теплового потока проводника при отсутствии и при наличии движения жидкости. Измерены зависимости изменения температуры на поверхности проводника с соединениями на основе наночастиц жидких кристаллов. Показано неоднородное перераспределение теплового поля. Представлены результаты исследования зависимости вязкости нематических жидких кристаллов от концентрации наночастиц. **Заключение.** Приведенные выше данные показывают, что тепловой эффект на поверхности распределен неравномерно. Для визуализации теплового эффекта более эффективными оказались соединения на основе наночастиц жидких кристаллов. Разработана методика, позволяющая определить направление и вычислить математически величину теплового потока жидкости в непрозрачном потоке проводника. Отметим, что при соединении наночастиц вязкость жидких кристаллов меняется.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вязкость, движение жидкости, жидкие кристаллы, концентрация, наноструктурные системы, наночастицы, проводник, температура, температурная неоднородность, тепловой эффект.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Рахматуллина Р.Г., Нжийа Н., Русинов А.А., Маскова А.Р. Исследование теплового эффекта на основе наночастиц жидких кристаллов // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 3. С. 235–242. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-235-242>. – EDN: HCGHR.

© Рахматуллина Р.Г., Нжийа Н., Русинов А.А., Маскова А.Р., 2024

ВВЕДЕНИЕ

Наноструктурные и высокодисперсные системы обладают химическими, электрическими, магнитными, механическими, оптическими и другими свойствами. Образование наноструктурных систем может привести к изменению физических свойств, а именно изменить предел прочности, текучести, теплоемкость, температуру, магнитные переходы и т.д., поэтому, обладая уникальными свойствами, широко привлекают внимание специалистов в области физики, химии, материаловедения, биологии [1–3].

В настоящее время известно, что течение жидкостей и газов по водопроводным, нефтепроводным и газопроводным трубам встречается во многих областях промышленности. Физико-химические законы течения жидкостей и газов оказывают важную роль на протекание процесса разделения.

В непрозрачных проводниках появляется задача определения направления, измерения величины потока жидкости и расхода потока объема жидкости в проводниках. Имеется несколько способов определения теплового эффекта и температуры [4–8]. В данной работе измерение теплового эффекта проводилось пирометрическим способом.

Рассмотрим два тела, приведем их в соприкосновение и будем нагревать.

Мы знаем, что при этом температура будет изменяться во времени. Соприкосновение тел приводит к увеличению движения мельчайших частиц, и, соответственно, будет происходить обмен энергией между мельчайшими частицами. Обмен энергией, передаваемой между мельчайшими частицами от более горячего тела к более холодному, называют тепловым эффектом (потоком). Таким образом, теплота распространяется от точки с более высокой температурой к точке с более низкой температурой во всех направлениях. Для возникновения теплового эффекта в различных поверхностях пространства достаточно в этих поверхностях создать разные температуры с наличием разности температур [9–13].

Тепловые трубы – важнейшие элементы теплоэнергетических установок, представляющие собой автономные, герметично-замкнутые, двухфазные теплопередающие устройства. Перечислим преимущественные достоинства: простота конструкции, способность выдерживать большие тепловые потоки при незначительных перепадах температуры, небольшая масса, тепловая труба может работать в широком интервале температур, к тому же теплопроводящие свойства тепловых труб выше, чем у самых теплопроводных металлов [14–19].

Принцип действия тепловых труб заключается в том, что перенос тепла происходит за счет того, что в горячем участке трубы жидкость испаряется, по-

том конденсируется на холодном участке. Жидкость возвращается в испаритель за счет капиллярных сил [18–23].

При создании тепловых труб возникают трудно решаемые проблемы – это совместимость материалов.

Исследование и ремонт трубопроводов с использованием композитных материалов доказывает свою высокую эффективность [24–28].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Во всех телах перенос теплоты зависит от перераспределения температуры. Для появления перераспределения теплоты необходима разность температур.

Для изучения теплового эффекта собрана экспериментальная установка, которая состоит из термостата, нагревателя и термодары. Вода в термостате при постоянной температуре пропускается через проводник. Для нагревания участка внешней поверхности потока проводника используется нагреватель с пластиной. Температура в области нагрева определяется термодарой, показания которой выводятся на мультиметры [29–31].

В эксперименте в зоне проводника действует тепловой поток. Отметим, что на перераспределение теплового поля влияют такие процессы, как теплопроводность и теплоотдача. При теплопроводности перенос теплоты происходит на молекулярном уровне между различными частями тел. При броуновском движении молекул, атомов или наночастиц, при столкновении друг с другом происходит перенос энергии соответственно между молекулами, атомами или наночастицами. Когда по проводнику течет ток, выделяется мощность, при этом плотность тока также увеличивается, и все это приводит к увеличению выделения теплоты и температуры.

Для использования перераспределения теплоты в проводниках в расчетах нами предложено выражение закона Фурье:

$$q = -\beta T,$$

где β – коэффициент теплопроводности; T – температура.

В результате неравномерного нагревания проводника наблюдаются тепловые потоки. Перераспределение температурного поля является довольно сложной задачей. Ранее проведенные экспериментальные исследования показали, что измерение температуры возможно только пирометрическим методом. Согласно пирометрическому методу, исследуемый образец должен покрываться тонким слоем материала.

Для наблюдения теплового эффекта использовались соединения на основе наночастиц жидких кри-

Таблица 1

Наименование соединений на основе наночастиц жидких кристаллов

№	Соединения жидких кристаллов	Количественные соотношения соединений
I	Холестерилолеат и гексилоксибензойная кислота	6:2
II	Холестерилолеат и нонилоксибензойная кислота	3:1
III	Холестерилолеат и бутилоксибензойная кислота	5:2

сталлов. Жидкие кристаллы обладают уникальным свойством, таким, как текучесть, которая присуща обычным жидкостям.

На основании электронных спектров были рассчитаны размеры наночастиц жидких кристаллов в пределах от 1,7 до 4 нм. Сами соединения представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что для получения соединений жидких кристаллов во всех соотношениях применялся холестерилолеат, в основу которого добавлялись различные кислоты в разных количественных соотношениях. В данной работе использовалось соединение на основе наночастиц жидких кристаллов под номером I.

Для получения экспериментальных соединений использовалась следующая схема. В начале все соединения в представленных в табл. 1 соотношениях помещались в стеклянный сосуд. В первом случае частицы перемешивались специальной стеклянной палочкой, и соединения доводились до однородной массы. Второй случай позволил получить однородное распределение наночастиц. В третьем случае приготовленные соединения нагревались до температуры до полного расплавления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные соединения наносились тонкой пленкой на поверхность проводника (приблизительно 10 мкм). Далее на поверхности проводника осуществлялась теплоотдача с образованием многокрасочных цветов. Измерения проводились при помощи оптического пирометра, за начало отчета взята область нагрева.

На месте, где осуществляется нагрев, происходит поглощение тепла. При этом тепловое поле устремляется ровно и постепенно. Напомним, что на распределение тепла влияют теплопроводность и теплоотдача.

Нами были измерены зависимости изменения температуры на поверхности проводника с соединениями на основе наночастиц жидких кристаллов. В результате эксперимента получили три зависимости изменения температуры на поверхности проводника в зоне нагревания и в зоне охлаждения.

На рис. 1 приведен график зависимости изменения температуры в зоне теплового эффекта проводника в отсутствии движения жидкости.

На рис. 2 представлен график зависимости перераспределения температуры в зоне теплового

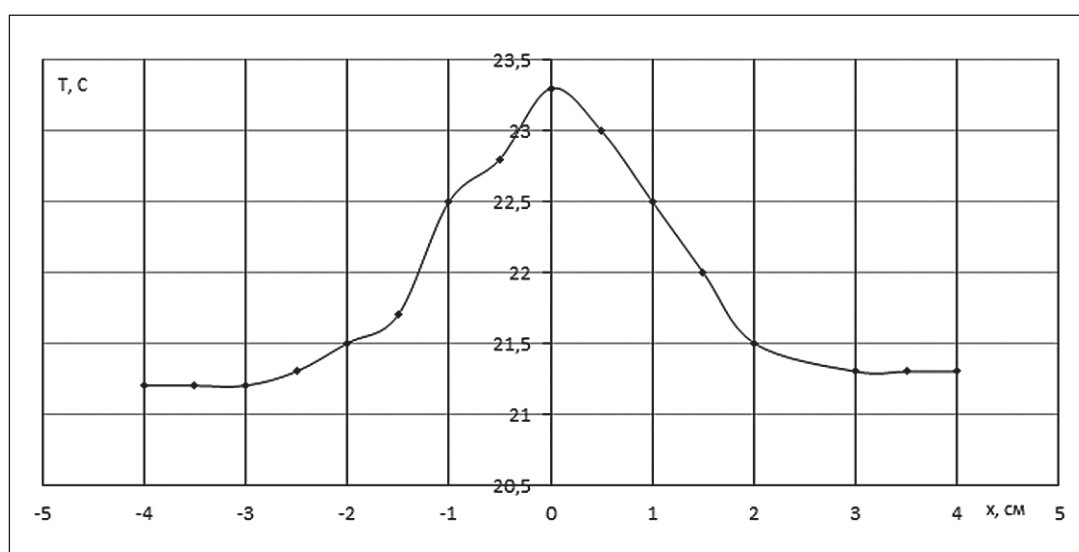


Рис. 1. График зависимости изменения температуры в зоне теплового эффекта проводника в отсутствии движения жидкости

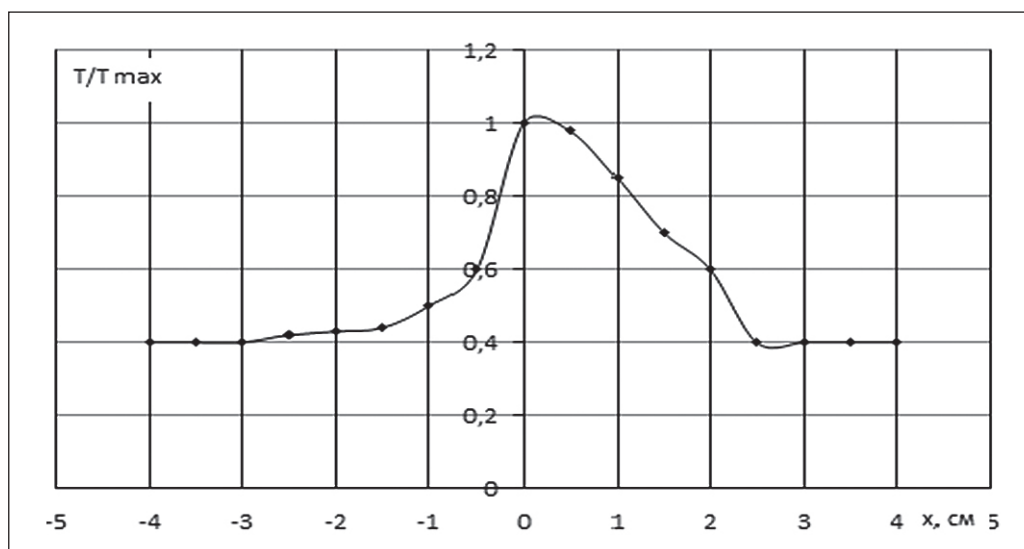


Рис. 2. График зависимости изменения температуры в зоне теплового потока проводника в присутствии движения жидкости

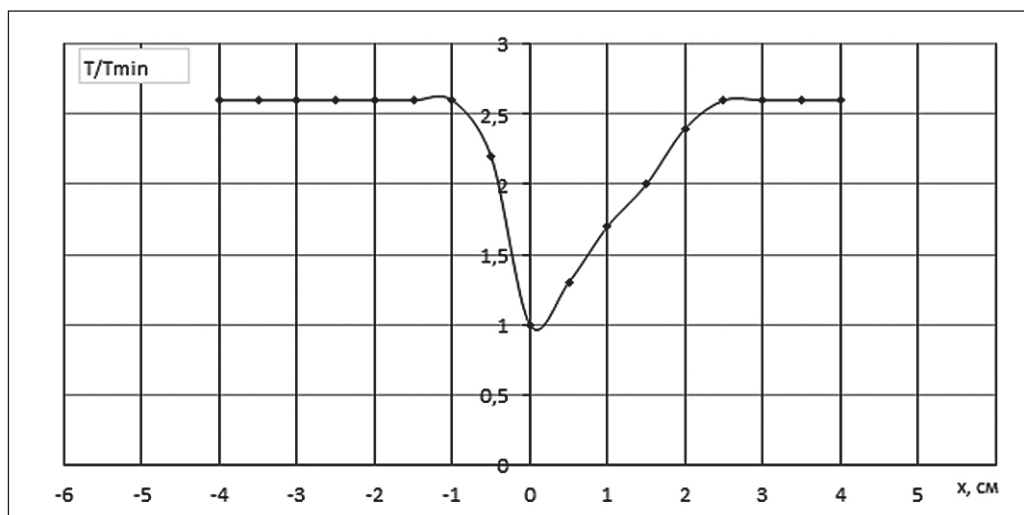


Рис. 3. График зависимости изменения температуры проводника в зоне охлаждения

эффекта проводника, когда присутствует движение жидкости.

Представленные на рис. 1 и 2 графики имеют нелинейные зависимости, и на всех кривых имеется четко выраженный максимум, который в зоне теплового эффекта в присутствии движения жидкости смещается [32, 33].

Из рис. 3 видно, что на месте, где осуществляется охлаждение потока проводника, график зависимости перераспределения температуры имеет ассиметричные изменения.

Таким образом, из проведенных экспериментальных исследований получили наличие теплового эффекта жидкости [34]. В результате отметим, что при наличии движения жидкости и в отсутствие

движения жидкости наблюдается неравномерное распределение температурного поля.

Скорость движения жидкости рассчитали по следующей формуле:

$$v = Q/S, \quad (1)$$

где Q – расход потока объема жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; S – площадь поперечного сечения проводника, м^2 .

Расход теплового потока рассчитали по формуле:

$$Q = V/t, \quad (2)$$

где V – объем жидкости, м^3 ; t – время, с.

Таблица 2

Характеристики скорости движения и расхода потока объема жидкости

Скорость движения жидкости, v , м/с	Расход потока объема жидкости, $Q \cdot 10^{-5}$, м ³ /с
0,0995	1,66
0,0331	5,00
1,6600	0,83

Для наблюдения направления теплового эффекта математически рассчитали по вышепоказанным формулам величины скорости движения жидкости v и расход потока объема жидкости Q [35]. Полученные значения представлены в следующей табл. 2.

Используя табл. 2, построили спектры (рис. 4) перераспределения температур на поверхности проводника для различных скоростей движения жидкости. Первому спектру соответствует скорость $v_1 = 0,0995$ м/с, второму спектру соответствует скорость $v_2 = 0,0331$ м/с и третьему спектру – $v_3 = 1,660$ м/с.

Из рис. 4 видно, что с повышением значений скоростей движения жидкости спектры перераспределения температур и тепловой эффект сужается.

В следующем графике приведена зависимость мощности нагревателя на поверхности проводника от скорости потока жидкости (рис. 5).

Как видно из рис. 5, для поддержания постоянной температуры с увеличением скорости надо увеличивать мощность нагревателя. До скорости 0,155 м/с наблюдается линейная зависимость, при дальнейшем увеличении значений скорости потока график становится более пологим. Возможно, в этой точке изменяется режим движения жидкости.

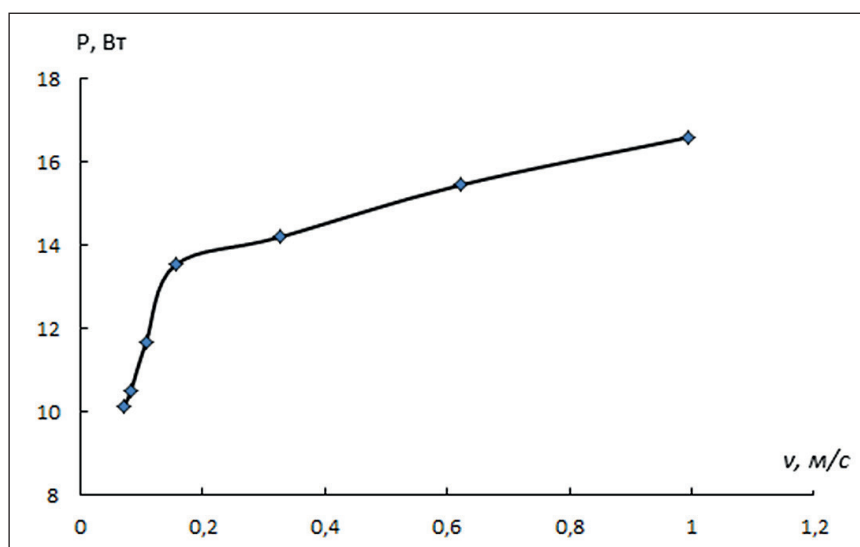


Рис. 5. График зависимости мощности нагревателя на поверхности проводника от скорости потока жидкости

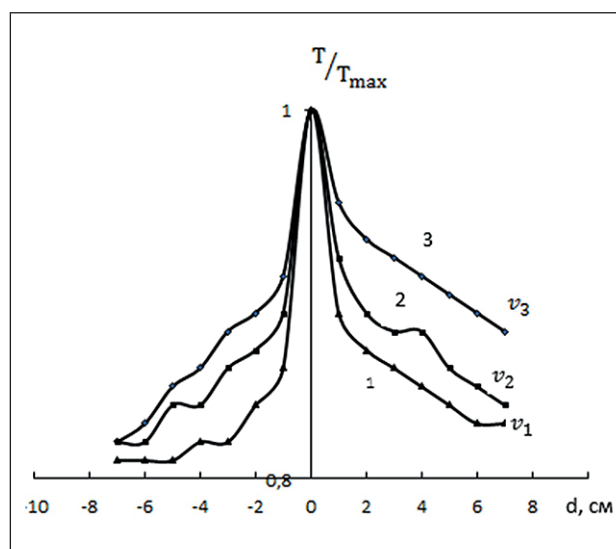


Рис. 4. Спектры перераспределения температур на поверхности проводника для различных скоростей движения жидкости

Анализируя полученные зависимости, можно математически вычислить величину потока жидкости [36].

Рассмотрим жидкость с температурой T , которая движется в проводнике с поперечной поверхностью S . Изменение температуры жидкости вдоль проводника равно:

$$dT = (t, x) = \frac{\partial T}{\partial t} dt + \frac{\partial T}{\partial x} dx,$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} \frac{dx}{dt}$$

Так как $dx/dt = v$, тогда $dT/dt = (\partial T/\partial t + \partial T/\partial x)v$, где $\partial T/\partial t$ – производная температуры по времени; $(\partial T/\partial x)v$ – конвективный член, характеризующий конвективные теплообменники.

Если температура остается постоянной во времени, то $\partial T/\partial t = 0$, тогда получим выражение:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{v} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

Согласно уравнению (3), чем больше жидкость находится в движении (увеличение скорости), тем меньше происходит теплообмен с внешней средой, как показано на рис. 5. Зависимость мощности нагревателя для поддержания постоянной температуры на поверхности теплопроводника от скорости потока жидкости вначале характеризуется очень быстрым ростом мощности, а далее имеет линейную эволюцию (уменьшение мощности). Возможно, это связано с тем, что чем больше жидкость находится в движении, тем больше происходит обмен тепла путем конвекции.

При теплоотдаче на поверхности проводника появляются многокрасочные цвета.

На рис. 6 показано изображение, когда нет движения жидкости по проводнику.

Если в проводнике происходит движение жидкости, то имеет место тепловой поток и изображение при этом меняется (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что белому цвету подходит холодная зона, а синему цвету подходит теплая зона проводника.

Далее дополнительно в данной работе рассмотрены влияния вязкости жидких кристаллов от концентрации наночастиц. Для этого в рамках исследования были рассмотрены нематические жидкие кристаллы с добавлением наночастиц ($Ta-Si$) с различными концентрациями. Приведем структурную формулу нематического жидкого кристалла 4-нитробензилиден-4'-гептоксианилин: $C_7H_{15}-O-C_6H_4-N=CH-C_6H_4-NO_2$.

Изменяли концентрацию наночастиц от 0,25 до 3%. С помощью лазерного анализатора определили размеры наночастиц $Ta-Si$. Средний диаметр наночастиц $Ta-Si$ получился около 8 нм. В табл. 3 приведены результаты измерений вязкости нематических жидких кристаллов от концентрации наночастиц $Ta-Si$.

Таблица 3

Результаты измерений вязкости нематических жидких кристаллов от концентрации наночастиц $Ta-Si$

Концентрация наночастиц $Ta-Si$, %	Вязкость, η , мПа·с
Жидкий кристалл	
0,25	315,1
0,50	354,7
1,00	374,6
2,00	385,2
3,00	433,4

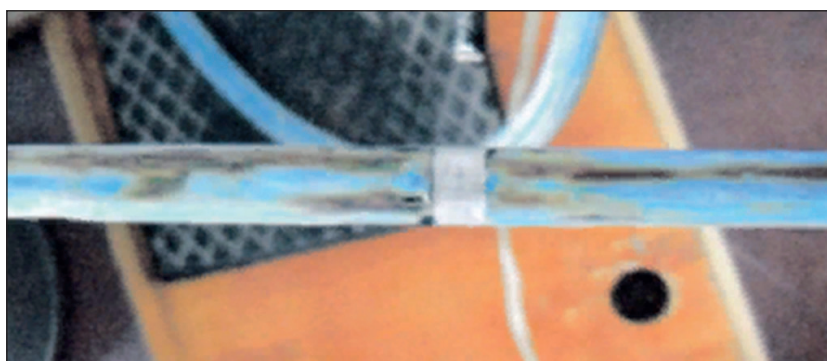


Рис. 6. Изображение теплового потока при отсутствии нагрева и движения жидкости

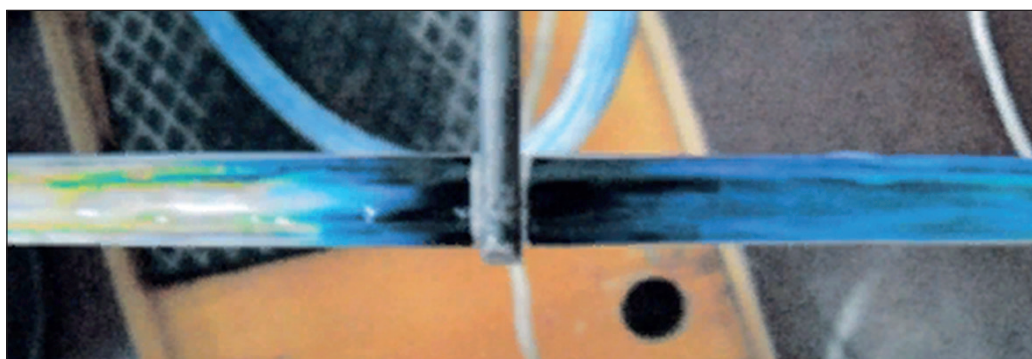


Рис. 7. Изображение теплового потока в наличии движения жидкости

Из приведенной выше табл. 3 видно, что с увеличением концентрации наночастиц $Ta-Si$ вязкость жидких кристаллов увеличивается.

ВЫВОДЫ

При наблюдении теплового потока более эффективными оказались соединения на основе наночастиц жидких кристаллов, а именно хлестерилолеат и гексилоксибензойная кислота.

Приведенные выше данные показывают, что тепловой эффект на поверхности распределен неравно-

мерно. Отметим, что вызванное локальное изменение температуры на поверхности проводника показывает несимметричность температурного поля. Это еще раз доказывает существование эффекта теплового потока.

В результате экспериментального исследования было показано локальное изменение температуры поверхности потока проводника.

Приведенный способ можно применить для эффективного определения направления потока в случае непрозрачных стенок проводника.

Соединение наночастиц приводит к изменению вязкости жидких кристаллов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков Ю.Д. Проблемы развития нанотехнологий в России и за рубежом // Вестник Российской академии наук. 2007. Т. 77. № 1. С. 3–10.
2. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
3. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Изд. Центр «Академия», 2005. 192 с.
4. Неразрушающий контроль. Справочник: в 7 томах. Том 3. Под ред. чл.-корр. РАН В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
5. Румянцев С.В. Справочник по методам неразрушающего контроля. М.: Энергоиздат, 1982. 210 с.
6. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение: пер. с нем. Мир. 1989.
7. Приборы измерения расхода пара, жидкости и газа [Электронный ресурс]. URL: https://lms.kgeu.ru/plugin-file.php?file=%2F326605%2Fmod_resource%2Fcontent%2F1%2F%D0%A0%D0%B0%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B4.pdf.
8. Терехов А.В. Разработка методов и средств неразрушающего контроля теплофизических характеристик и толщины защитных покрытий материалов и изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Терехов Алексей Васильевич. Тамбов. 1997. 18 с.
9. Теория теплообмена: учеб. пособие / Л.А. Ткаченко, А.В. Репина; под общ. ред. проф. Н.Ф. Кашапова. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. 151 с.
10. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник. М.: Книга по требованию, 2013. 496 с.
11. Захарова А.А. Техническая термодинамика и теплотехника: учеб. пособие. 2-е изд. М.: Академия, 2008. 272 с.
12. Кобельков В.Н. Термодинамика и теплопередача. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2012. 328 с.
13. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Стефанюк Е.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник для академического бакалавриата. — 3-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во Юрайт, 2015. 566 с.
14. Чи С. Тепловые трубы: теория и практика: пер. с англ. В.Я. Сидорова. М.: Машиностроение, 1981. 207 с.
15. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы: пер. с англ. Ю.А. Зейгарник. М.: Энергия, 1979. 272 с.
16. Тепловые трубы: под ред. Э.Э. Шпильрайна. М.: Мир, 1972. 420 с.
17. Чернышева М.А., Майданик Ю.Ф. Моделирование тепломассопереноса в цилиндрическом испарителе контурной тепловой трубы с прямоугольным интерфейсом // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 3. С. 362–372.
18. Москвин Ю.В., Филиппов Ю.Н. Тепловые трубы // ТВТ. 1969. 7:4. С. 766–775.
19. Папченков А.И. Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик термосифонов котлов-утилизаторов: дис. канд. техн. наук: 05.14.04. Екатеринбург. 2018. 146 с.
20. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
21. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
22. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В. Физические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1978. 256 с.
23. Васильев Л.Л. Теплообменники на тепловых трубах. Минск: Наука и техника, 1981. 143 с.
24. Композиционные материалы: справочник / В.В. Васильев. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
25. Кристенсен Р.М. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1990. 336 с.

26. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Пирайнен В.Ю. Специальные материалы в машиностроении: учебник для вузов. М.: Химиздат, 2014. 638 с.
27. Попов А.Ю., Госина К.К., Петров И.В., Макарова А.Е., Балова Д.Г., Пепеляев А.В. Классификация, состав, достоинства и недостатки многокомпонентных композитных материалов // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 42–45.
28. Воробьев И.Н. Преимущество применения композитных материалов при ремонте трубопроводов // Экспозиция Нефть Газ. 2013. № 7 (32). С. 47–50.
29. Рахматуллина Р.Г., Гарайшин А.И., Маскова А.Р. Экспериментальное определение показателя теплообмена – теплопроводности – для фторсодержащих полимеров // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2022. Т. 78. № 1. С. 27–30.
30. Алтунин В.А., Давлатов Н.Б. Экспериментальная база и методики проведения исследований теплофизических свойств жидкого чистого гидразина и его смесей с неметаллическими добавками – фуллеренами // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2019. № 3. С. 30–38.
31. Коханова Ю.С., Куимов Р.А., Лэй И.А. Определение зависимости коэффициента теплоотдачи и критических тепловых потоков от геометрических параметров трехмерных микроструктурированных поверхностей, полученных методом деформирующего резания, при кипении различных жидкостей // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2020. № 4. С. 12–17.
32. Ягов В.В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. 542 с.
33. Готовский М.А., Суслов В.А. Тепломассообмен в технологических установках ЦБП: учеб. пособие. Часть 3. СПб.: СПб. ГТУ РП, 2013. 120 с.
34. Суслов В.А., Антуфьев С.В. Тепломассообменное оборудование ТЭС и АЭС: учеб. пособие. СПб.: СПб. ГТУ РП, 2015. 84 с.
35. Лопарев А.А. Применение теплоты в сельском хозяйстве. Сборник задач. Учеб.-метод. пособие для студентов инженерного факультета. Киров: Сельхозакадемия, 2000. 95 с.
36. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970. 712 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рахматуллина Резида Гайфулловна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика и математика», Казанский государственный аграрный университет, Республика Татарстан, Казань, Россия, rachmatrg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9658-3631>

Нжийа Нестор – ассистент, Казанский федеральный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия, nestornjiya@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-2555-7128>

Русинов Алексей Анатольевич – магистр кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Республика Башкортостан, Уфа, Россия, rogozhina864@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7608-3243>

Маскова Альбина Рафитовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Республика Башкортостан, Уфа, Россия, asunasf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8171-8027>

ВКЛАД АВТОРОВ

Рахматуллина Р.Г. – научное руководство; разработка методологии исследования; составление плана экспериментальных работ; проведение экспериментальных работ; обработка результатов эксперимента; написание исходного текста; выводы статьи.

Нжийа Н. – выявление зависимостей; анализ и обработка полученных результатов; написание исходного текста.

Русинов А.А. – сбор материала.

Маскова А.Р. – разработка методологии исследования; научное редактирование текста; доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.04.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 31.05.2024.