

УДК 614.841.1

magalishev@yandex.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ОТЛОЖЕНИЙ  
КОПОТИ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ГОРЕНИИ ТОВАРНЫХ  
НЕФТЕПРОДУКТОВ, В ЦЕЛЯХ РЕКОНСТРУКЦИИ ПРОЦЕССОВ  
ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ПОЖАРОВ**

**RESEARCH OF MORPHOLOGICAL FEATURES OF THE DEPOSITS  
OF A SOOT WHICH ARE FORMED WHEN BURNING COMMODITY OIL  
PRODUCTS FOR RECONSTRUCTION OF PROCESSES  
OF EMERGENCE AND DEVELOPMENT OF THE FIRES**

*Галишев М.А., доктор технических наук, профессор,  
Медведев А.Ю.,  
Бельшина Ю.Н., кандидат технических наук, доцент,  
Санкт-Петербургский университет  
ГПС МЧС России, Санкт-Петербург*

*Galishev M.A., Medvedev A.Yu., Bel'shina Yu.N.,  
Saint Petersburg University of State Fire Service  
of Emercom of Russia, Saint Petersburg*

В статье рассмотрены процессы формирования отложений копоти в условиях пожара. Проведено оптическое микроскопическое исследование проб копоти, полученных в разных температурных условиях и при разной пожарной нагрузке, а также установлены закономерности в структуре образцов, полученных при разных условиях горения. Описана установка и методика проведения экспериментов. Изучены зависимости морфологических характеристик частиц копоти от условий сгорания, в первую очередь, от температурного режима пиролиза и притока окислителя. Установлено, что морфологический анализ отложений копоти может быть использован при установлении факта применения в качестве инициаторов поджогов светлых нефтепродуктов. При изучении различных нефтепродуктов установлено, что наибольшее количество копоти осаждается при горении автомобильных бензинов, в наименьшей степени – при горении осветительного керосина. В случае авиационного керосина наблюдалось слабое закопчение поверхностей. При исследовании чистых образцов материалов пожарной нагрузки установлено, что чистый хлопок и автомобильный поролон не коптят, однако те же вещества, пропитанные бензином при сгорании коптят сильнее, чем исходный образец бензина. Полученные результаты способствуют расширению реконструкционных возможностей при проведении экспертиз пожарно-технического профиля.

*Ключевые слова:* пожар, копоть на пожаре, оптическая микроскопия, нефтепродукты, пожарно-техническая экспертиза.

In work processes of formation of deposits of soot in the conditions of the fire are considered. Optical microscopic research of the tests of soot received in different temperature conditions and at different fire loading is conducted and also consistent patterns in structure of the samples received under different conditions of burning are determined. Installation and technique of carrying out experiments is described. Dependences of morphological characteristics of particles of soot on combustion

conditions, first of all, from temperature condition of pyrolysis and inflow of oxidizer are studied. It is established that the morphological analysis of deposits of soot can be used at establishment of the fact of application as initiators of arsons of light oil products. When studying various oil products it is established that the greatest number of soot is besieged when burning automobile gasolines, least – when burning lighting kerosene. In case of aviation kerosene the weak zakopcheniye of surfaces was observed. At probe of clean samples of materials of fire loading it is established that pure cotton and automobile foam rubber do not smoke, however the same substances soaked with gasoline at combustion smoke stronger, than initial sample of gasoline. The received results promote expansion of reconstruction opportunities when conducting examinations of fire and technical cross-section.

*Keywords:* the fire, soot on the fire, optical microscopy, oil products, fire investigation.

На большинстве пожаров формируется своеобразная субстанция – дым, представляющая собой существенную угрозу жизни и здоровью людей, оказавшихся в задымленной зоне. С дымом связан один из опасных факторов пожара – снижение видимости в дыму [1]. Дым также содержит повышенную концентрацию токсичных продуктов горения и термического разложения и пониженную концентрацию кислорода, что также формирует опасные факторы пожара. Дым представляет собой относительно устойчивую дисперсную систему, содержащую твердые и жидкие продукты неполного сгорания каких-либо горючих материалов, взвешенные в газообразных продуктах сгорания. Дым является типичным аэрозолем с размерами частиц в среднем от  $10^{-7}$  до  $10^{-5}$  м. В связи с такими малыми размерами частицы дыма практически не оседают под действием гравитации. Дым является источником наслоений копоти, оседающей на различных поверхностях в зонах горения и задымления. Исследованию свойств дыма, посвящен ряд работ и научных исследований, направленных на снижение дымообразующей способности отделочных материалов.

В связи с неоднозначностью понятий копоть и сажа представляется необходимым определить трактовку указанных терминов, принятую в настоящей работе. Сажа – углеродистый продукт неполного сгорания или термического разложения органических

компонентов в неконтролируемых условиях пожара. Сажа является дисперсной фазой дыма и содержит как чистый аморфный углерод, так и битуминозные компоненты. Сажа – продукт неполного сжигания материалов, состоящие из круглых частиц черного цвета, по своей сути дисперсный углеродный продукт. Производными для сажи являются природный газ, ацетилен, жидкие углеводороды, а также другие соединения, содержащие большое количество ароматических соединений. Сажа образуется при столкновениях молекул, путем захвата других молекул. Эти первичные частицы сажи имеют практически сферическую форму и аморфное строение [3]. Позднее под действием теплового потока первичные частицы покидают зону горения, принимая форму дыма. На данный момент установлено, что размеры частиц сажи зависят от условий сгорания вещества. Размер частиц колеблется от 1 до 1000 нм, столь точную информацию удалось получить с помощью электронной микроскопии. Анализ электронных микрофотографий для различных условий горения позволил обнаружить широкий спектр форм частиц сажи: сферические или почти сферические частицы, цепочкообразные, хлопьевидные, кружевидные, нитевидные и другие структуры [4].

Копоть – сажевые частицы, осевшие на какую-либо поверхность. Копоть

– это осевшая на ограждающих конструкциях помещения дисперсная фаза дыма, присутствующая практически на любом пожаре. Копоть представляет смесь нерастворимых и графитизированных частиц, а также веществ, растворимых в органических растворителях, и зольные элементы. Свойства и состав копоти в значительной мере зависят от условий горения, сложившихся на пожаре: воздухообмен, температура горения, объем помещения, температура поверхности, на которую происходит осаждение, а также от вторичного прогрева закопчений. «Не исключено, что в дальнейшем исследование сажи даст возможность решать широкие задачи. Потенциал информативности этого объекта исследования явно не исчерпан», – пишет в своей книге И.Д. Чешко [2].

Механизм образования дыма при горении органических веществ заключается в конденсации пара. В процессе пиролиза и при недостатке кислорода возникают высшие углеводороды, молекулярный вес и концентрация которых увеличивается, пока не начнется конденсация, сопровождающаяся образованием мельчайших капель вокруг углеродных ядер. При непрерывном росте ядер содержание водорода в молекулярных структурах постепенно снижается вплоть до полной карбонизации.

Химический состав дыма напрямую зависит от того, что горит и в каком количестве. Именно горящие продукты определяют цвет дыма, по которому можно определить ряд его характеристик. Черный цвет дыма свидетельствует о наличии в пожаре сажи, что характерно для нефтепродуктов, резины, угля. Дым, насыщенный парами воды и окислами магния, будет иметь светлый оттенок. Серый, а иногда желтоватый цвет дыма указывает на горение волоса, кожи, резины, клея. Бурый – указывает на горение тканей, на тление или неполное горение других веществ, а желто-

бурый – на горение азотистых соединений, в которых присутствует окись азота. По цвету дыма вполне можно определить, что именно горит, однако он может изменяться в зависимости от условий горения.

Единственной работой, посвященной изучению возможности проведения морфологического анализа сажи (копоти) при экспертно-криминалистических исследованиях и разработке соответствующих методических рекомендаций, является работа Н.Г. Дудерова [5]. Вместе с коллегами он исследовал возможности дифференциации по сажевым частицам сгораемых материалов, используемых в самолетостроении: а) пластика СНП-С; б) жесткого обивочного материала, состоящего из сополимера полистирола СН-20П, поливинилхлорида, бутадииеннитрильного каучука с добавками трехоксида сурьмы, двуоксида титана, углекислого свинца и других компонентов; в) пенополиуретана ППУ-Э на основе изоцианатов; г) винилискожи авиационной Ва-3 на основе ПВХ; д) ткани «Венера» (шерсть, ацетохлорин, капрон); е) ковровой дорожки (шерсть, синтетика); ж) пола авиационного (комбинация жесткого ПВХ и древесины); з) основного горючего для самолетов – керосина ТС-1; и) гидрожидкости на основе керосина с присадками – АМГ-10. [6]. Полученные в результате исследования данные не смогли в полной мере доказать перспективность данного метода и, по сути, закрепили мнение о весьма малой эффективности морфологического анализа для решения экспертно-криминалистических задач. Авторы [5] проводили исследования на просвечивающем электронном микроскопе Tesla BS-500, фиксируя средний размер сажевых частиц, строилась кривая распределения частиц по размерам в зависимости от природы горевшего материала. Таким образом были выявлены определенные отличия,

но стоит принять во внимание мнение авторов: «... достоверность отнесения исследуемого объекта к тому или иному материалу зависит от идентичности условий образования образца и эталона». Таким образом, учитывая проведенные исследования можно прийти к выводу, что решаемые задачи в процессе морфологического анализа приобретают неопределенный характер.

В настоящей работе проведено оптическое микроскопическое исследование проб копоти, полученных в разных температурных условиях и при разной пожарной нагрузке, а также установлены закономерности в структуре образцов, полученных при разных условиях горения.

В качестве объектов исследования выбраны образцы копоти, полученные из разных материалов при разной пожарной нагрузке и температуре. Для получения копоти использовались различные ЛВЖ и ГЖ, а также образцы ткани и древесины. Копоть осаживалась на стекла и плитку в специально созданной установке.

Установка для осаждения копоти представляет собой печь, в вытяжной трубопровод которой помещены приспособления для горизонтального и вертикального крепления поверхностей осаждения. В топку печи помещается ЛВЖ, ГЖ или материалы, подлежащие изучению, сжигание которых должно обеспечить образование достаточного количества копоти. Образцы поджигаются с помощью факела, установка закрывается. Также установка предусматривает функцию определения температуры горения, для этого используются 2 термодатчики, одна из которых находится в топке, другая у поверхности осаждения. Для проведения исследования выбран метод оптической микроскопии. Снимки для морфологического исследования в настоящей работе были получены на стереомикроскопе Альтами. Обработка

проводилась в программном обеспечении Altami Studio 3.3.

Для анализа был получен ряд образцов. Исследование проводилось в двух направлениях: сравнения закопченности стекол, полученных от одного образца при разной температуре, и сравнение копоти, полученной из разных материалов при одинаковых условиях осаждения.

Методика эксперимента включает в себя несколько этапов.

1. Поджигание исследуемого образца в лабораторной установке.

2. Извлечение образцов с копотью.

3. Рассмотрение полученных образцов под микроскопом.

4. Выделение на исследуемом образце участка  $10 \times 10$  мм.

5. Выявление основных параметров (число наиболее плотных скоплений, их длина, ширина, площадь, коэффициент вытянутости зерна, коэффициент вытянутости зерен как отношение длины зерна к ее ширине, коэффициент наполнения на  $1 \text{ мм}^2$ ).

6. Обработка полученных результатов.

7. Сравнение полученных образцов.

Исследованию были подвержены следующие материалы: бензины – АИ-92, АИ-G95, АИ-G98, ДТ, Керосин осветительный, Керосин авиационный (ТС-1), ткань х/б, та же ткань, смоченная в бензине АИ-G95, поролон из сидения автомобиля, он же, смоченный в бензине АИ-G95, деревянная щепка.

При исследовании копоти, образовавшейся при сжигании 15 мл бензина АИ-92 фирмы Neste в течение 3 минут установлена закономерность в формировании копоти на вертикальной и горизонтальной поверхностях. При горизонтальном закреплении поверхности осаждения копоть, полученная из образцов, более плотная и темная, по сравнению с вертикальным креплением. Это связано с восходящими

конвективными потоками, продукты горения поднимаются вверх и, встречая преграду в виде стекла, осаживаются на нее по всей поверхности, при

вертикальном креплении поверхности осадения такой преграды нет и копоть осаживается не столь плотно.

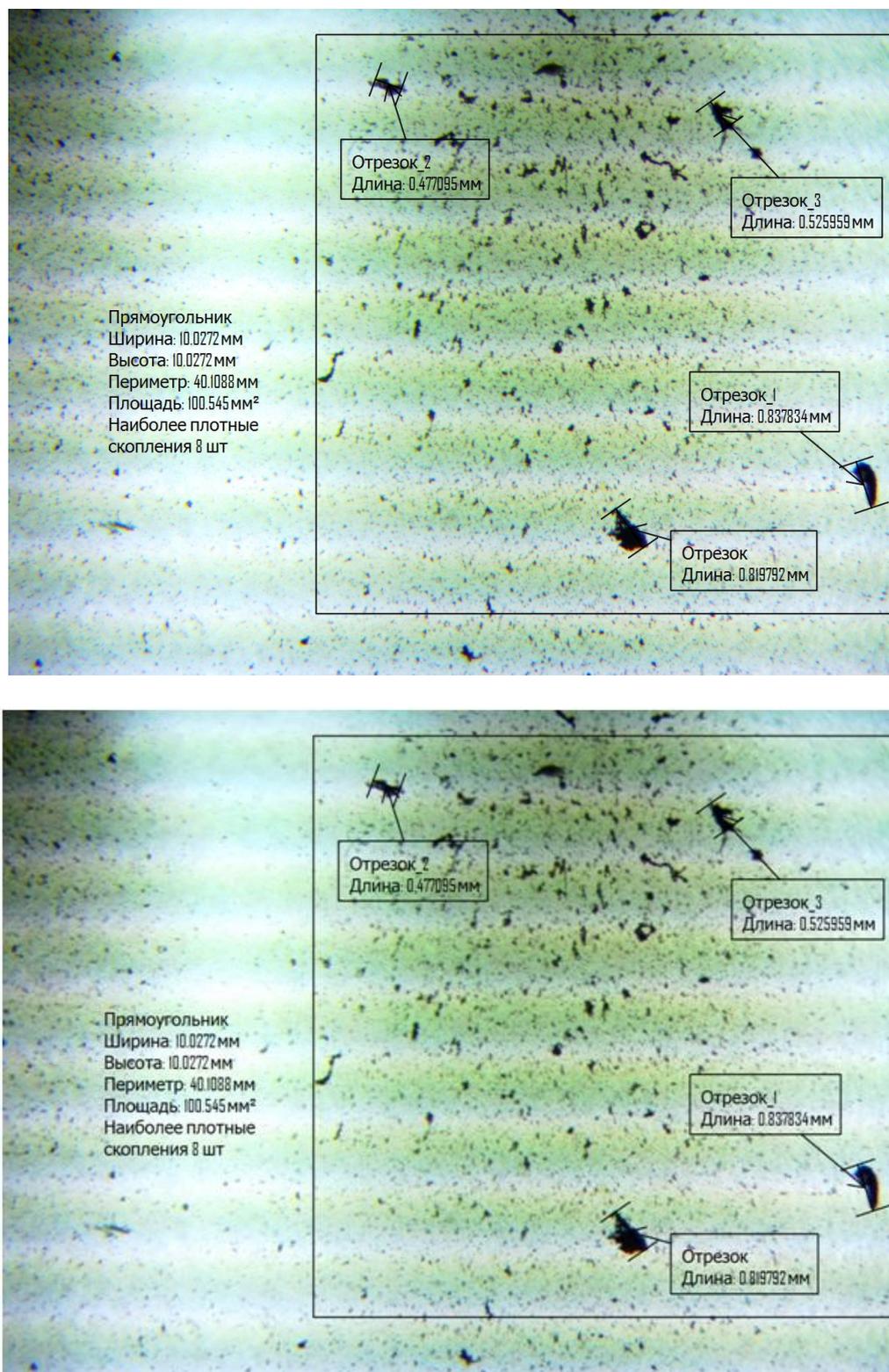


Рисунок 1. Образец бензина АИ-92, вертикальное закрепление стекла.  
Минимальное приближение микроскопа, проходящий свет

Для коפותи образцов, закрепленных вертикально, характерна меньшая площадь порошинок, но больший коэффициент наполненности на  $1 \text{ мм}^2$ , коэффициент удлинения зерна практически у всех образцов равен 2 (рисунок 1). При горизонтальном

креплении поверхности осаждения для коפותи характерна большая площадь, коэффициент наполненности разнится в зависимости от образца, коэффициент вытянутости зерна составляет больше 3 (рисунок 2).

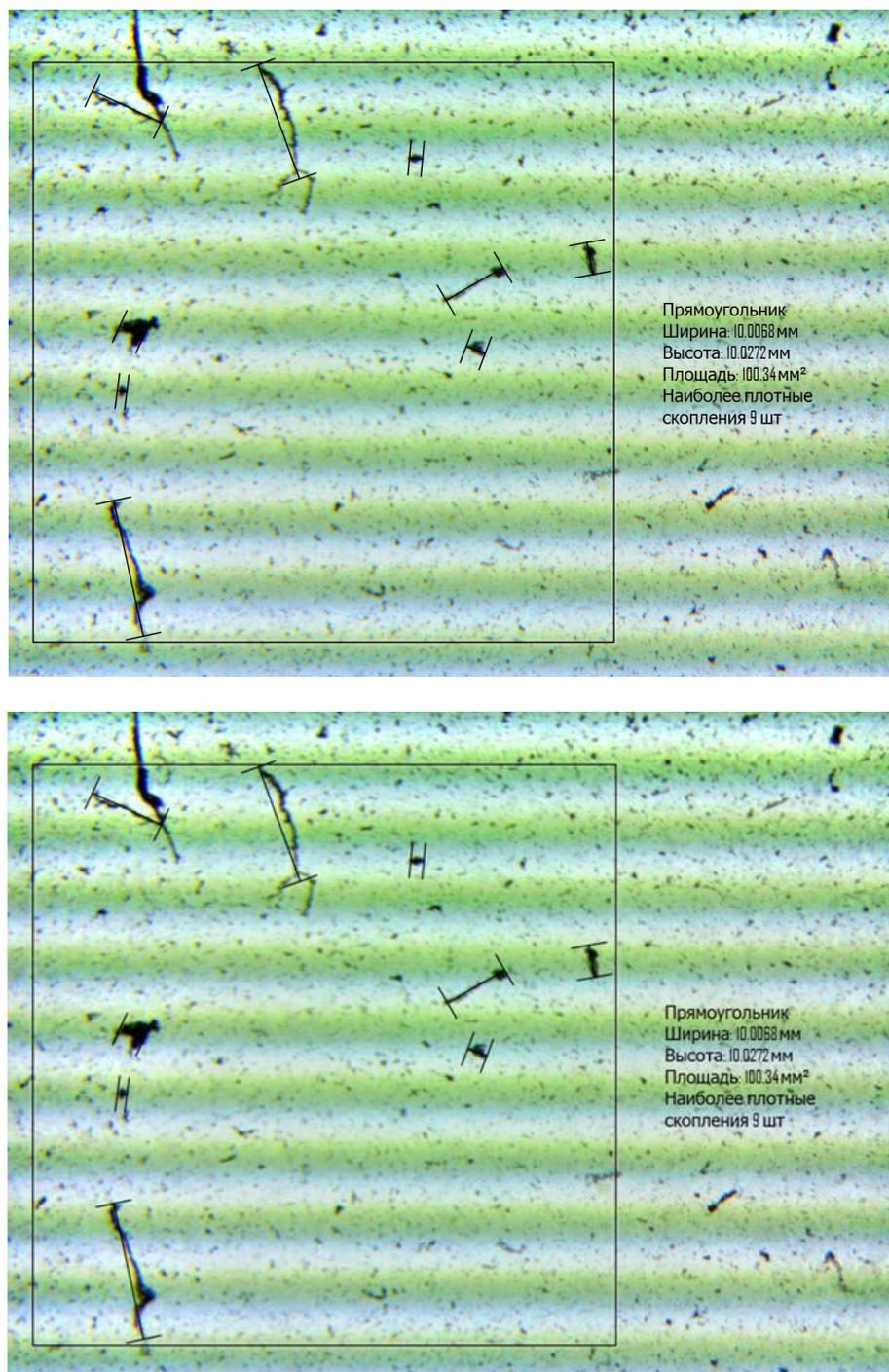


Рисунок 2. Образец бензина АИ-92, горизонтальное закрепление стекла, минимальное приближение микроскопа, проходящий свет

При сравнении различных нефтепродуктов установлено, что наибольшее количество копоти осаждается при горении автомобильных бензинов, в наименьшей степени – при горении осветительного керосина. В случае авиационного керосина наблюдалось закопчение поверхностей.

При исследовании чистых образцов материалов установлено, что чистый хлопок и автомобильный поролон не коптят, однако те же вещества, пропитанные бензином, при сгорании коптят сильнее, чем исходный образец бензина (рисунок 3).

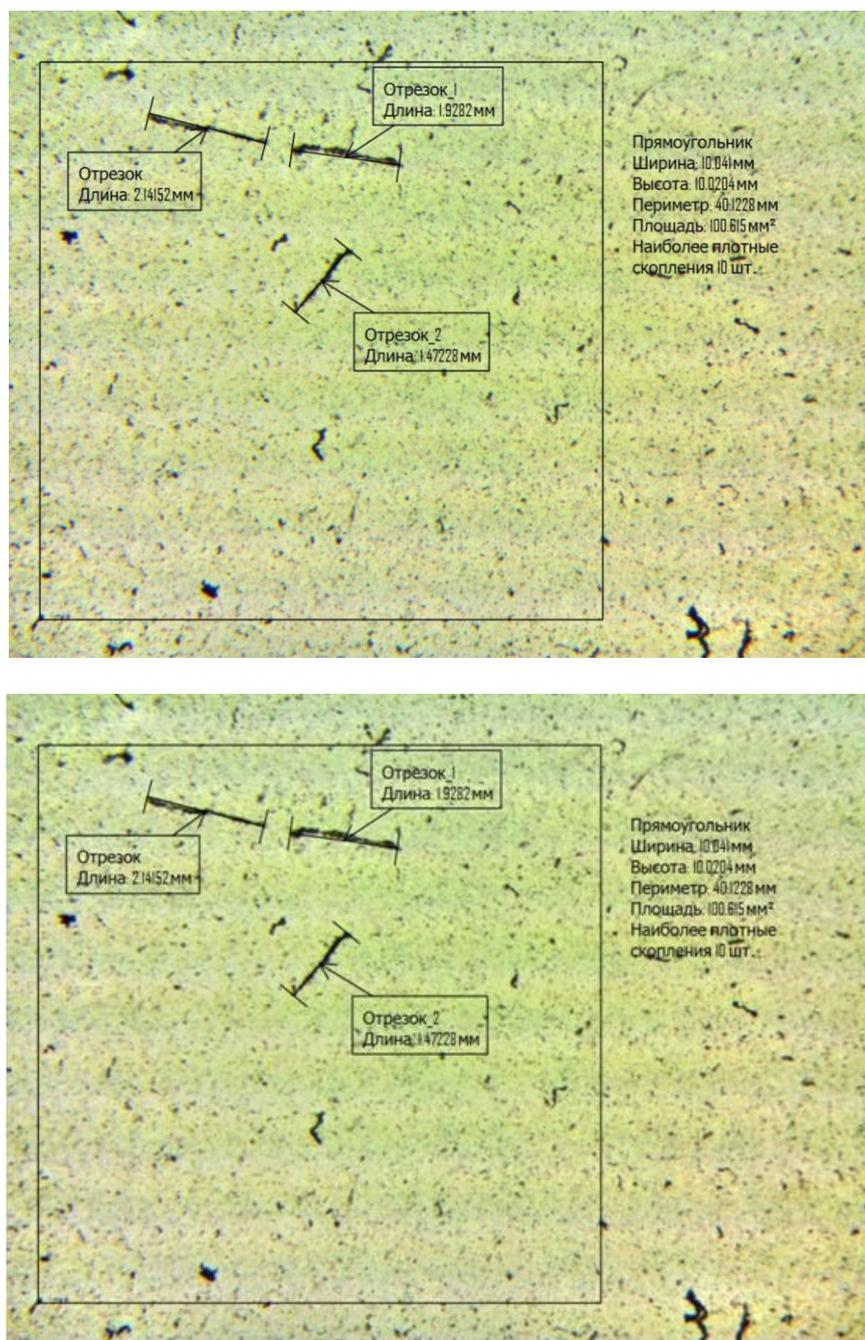


Рисунок 3. Образец хлопчатобумажной ткани, пропитанный автомобильным бензином АИ-G95. Горизонтальное закрепление стекла. Минимальное приближение. Проходящий свет

Важную роль при расследовании пожара играет установление факта поджога, при совершении которого нередко используются различные горючие жидкости, в частности нефтепродукты. В рамках настоящей работы было установлено, что морфологический анализ отложений копоти может быть использован при установлении факта применения в качестве инициаторов поджогов светлых нефтепродуктов. Однако полученные данные не позволяют с высокой долей вероятности дифференцировать сгоревшие вещества путем исследования отложений копоти после пожара. Было установлено, что чистая ткань х/б не коптит, также незначительное количество копоти образуется при горении чистого автомобильного поролона, данная закономерность позволяет определить присутствие ЛВЖ и ГЖ в салоне автомобиля, а именно на сидениях, в рамках экспертизы автотранспорта.

Так же в рамках данной квалификационной работы изучены

зависимости морфологических характеристик частиц копоти от условий сгорания, в первую очередь, от температурного режима пиролиза и притока окислителя. К сожалению, установить четкой закономерности изменения частиц копоти при возрастании температуры горения не удалось, но получилось зафиксировать, что при осаждении копоти на горизонтальную и вертикальную поверхность, за счет конвективных потоков, образуются разные морфологические характеристики отложений копоти.

Таким образом, значимость формирования концептуальных основ морфологического исследования копоти обусловлена, с одной стороны, недостаточной научной разработанностью, с другой стороны, большой практической значимостью расширения реконструкционной способности в целях повышения качества экспертиз пожарно-технического профиля.

#### Литература

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федеральный закон № 123-ФЗ от 22.07.2008 // Собр. законодательства РФ. 2008. № 30 (ч. I), ст. 3579.
2. Чешко И.Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования) / под науч. ред. канд. юр. наук Н.А. Андреева. СПб.: СПбИПБ МВД России. 1997. 562 с.
3. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. М.: Химия, 1972. С. 39.
4. Козлов В.С., Панченко М.В. Исследование оптических свойств и дисперсного состава древесных дымовых аэрозолей // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, №5. С. 122-133.
5. Определение вида сгоревших авиационных материалов по физико-химическим характеристикам образовавшейся копоти: метод. рекомендации / Н.Г. Дудеров и др. М.: ВНИИПО, 1986.
6. <http://www.rumex.ru/information/stereoskopicheskie-mikroskopy-128> 02.04.2018.

#### References

1. Tekhnicheskiiy reglament o trebovaniyakh pozharnoy bezopasnosti: federalnyy zakon № 123-FZ ot 22.07.2008 // Sobr. zakonodatelstva RF. 2008. № 30 (ch. I). st. 3579.
2. Cheshko I.D. Ekspertiza pozharov (obyekty, metody, metodiki issledovaniya) / pod nauch. red. kand. jur. nauk N.A. Andreyeva. SPb.: SPbIPB MVD Rossii. 1997. 562 s.
3. Grin Kh., Leyn V. Aerозoli – pyli, dymy i tumany. M.: Khimiya. 1972. S. 39.
4. Kozlov V.S., Panchenko M.V. Issledovaniye opticheskikh svoystv i dispersnogo sostava drevsnykh dymovykh aerозoley // Fizika goreniya i vzryva. 1996. T. 32. №5. S. 122-133.
5. Opredeleniye vida gorevshikh aviatsionnykh materialov po fiziko-khimicheskim kharakteristikam obrazovavsheysya kopoti: metod.rekomendatsii / N.G. Duderov i dr.M.: VNIPO. 1986.
6. <http://www.rumex.ru/information/stereoskopicheskie-mikroskopy-128> 02.04.2018.