

Особенности исследования полиуретана при поджогах

© Г. В. Плотникова^{1(✉)}, К. А. Кузнецов², С. Ф. Малышева³

¹ Восточно-Сибирский институт МВД России (Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 110)

² Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы "Испытательная пожарная лаборатория" по Иркутской области (Россия, 664009, г. Иркутск, ул. Култукская, 10)

³ Иркутский институт химии им. А. Е. Фаворского СО РАН (Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1)

РЕЗЮМЕ

Введение. Для интенсификации горения в большинстве случаев злоумышленниками применяются инициаторы горения — доступные и дешевые нефтепродукты (бензин, дизельное топливо, моторные масла или их смеси). Чтобы установить причину криминального пожара, необходимо определить наличие инициатора горения на месте пожара. Исследование проводилось с целью установления мешающего влияния продуктов разложения объекта-носителя на определение наличия дизельного топлива.

Материалы и методы. В качестве объекта-носителя был выбран полиуретан (обивка автомобильных кресел), который способен адсорбировать на своей поверхности жидкость, в качестве инициатора горения — дизельное топливо как наиболее распространенный инициатор горения. Для исследования применялся метод флуоресцентной спектроскопии.

Результаты исследования и их обсуждение. Пробы полиуретана с дизельным топливом на поверхности и без него обжигались в муфельной печи при температурах от 200 до 300 °С в течение 5–20 мин. После обжига проводилось экстрагирование измельченных проб, и на флуориметре снимались спектры флуоресценции.

Выводы. Анализ результатов исследований показал, что при нагревании образцов полиуретана, обработанного дизельным топливом, до 250 °С включительно в течение 5, 10, 15 и 20 мин возможна идентификация инициатора горения как сильно выгоревшего дизельного топлива. При нагревании образцов полиуретана до температуры выше 250 °С идентификация инициатора горения как сильно выгоревшего дизельного топлива невозможна.

Ключевые слова: полиуретан; инициатор горения; флуоресцентный анализ; моноароматические углеводороды; биароматические углеводороды; светлые нефтепродукты; люминесценция; дизельное топливо.

Для цитирования: Плотникова Г. В., Кузнецов К. А., Малышева С. Ф. Особенности исследования полиуретана при поджогах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 2. — С. 31–38. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.31-38.

✉ Плотникова Галина Викторовна, e-mail: plotnikovagv@mail.ru

Введение

Количество поджогов в России год от года растет угрожающими темпами. В результате этого преступного деяния уничтожаются автомобили, недвижимость, документы. Более того, жертвами поджога становятся люди [1]. В настоящее время поджог в России относится к наиболее доступному и простому методу сведения счетов, устрашения, давления на конкурента или иное неугодное лицо. "Количество поджогов неуклонно увеличивается, так как вероятность раскрытия преступления после пожара, уничтожающего, по мнению злоумышленника, все следы, значительно снижается. Подобная тенденция ведет к неукоснительному росту нераскрытых пожаров, поскольку вместе с ростом популярности поджогов среди криминальных элементов растет и мастерство поджигателей, совершенствуются их методы, применяются новые поджигающие вещества" [2].

Занесение открытого источника огня с применением инициаторов горения следует отнести к социально опасным причинам пожара. Проблема определения инициаторов горения становится все более

актуальной, при этом роль пожарно-технического эксперта является ключевой, так как от его грамотных и быстрых действий зависит успех дальнейшего расследования.

Наличие нескольких очагов, быстрое распространение горения, нехарактерное для имеющихся на объекте горючих материалов, может быть следствием применения инициаторов горения, чаще всего легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), реже горючих (ГЖ), которые и используются преступниками в качестве средств поджога [2].

Многие специалисты считают, "что главным фактором, который определяет частоту применения тех или иных легковоспламеняющихся и горючих жидкостей в качестве инициаторов горения, является их распространенность и доступность для поджигателей, основная масса которых использует первое, что попадает под руку. Именно поэтому часто применяются так называемые светлые нефтепродукты — бензины, керосин, дизельные топлива. За последние три-четыре года поджигатели используют для совершения преступления дизельные топлива, авто-

мобильные бензины, но наиболее часто применяют смеси ЛВЖ и ГЖ (смесь автомобильного бензина с дизельным топливом, моторным маслом: смесь моторного масла с дизельным топливом и смесевым растворителем)” [2, 3].

Установление очага и причины любого пожара — задача сложная и требует от специалиста высокой квалификации. Одной из главных задач эксперта при идентификации инициаторов горения является обнаружение их в зоне очага пожара, установление их причастности к возникновению горения, определение компонентного состава. Задача трудноразрешимая, так как в условиях развившегося пожара обнаружить следы инициаторов горения затруднительно ввиду их быстрого выгорания, но есть возможность определить их на объектах-носителях. В качестве таких объектов выступают твердые материалы, на поверхности которых адсорбируются остатки ЛВЖ или ГЖ [3]. Одним из таких материалов является полиуретан, широко распространенный как в быту, так и в промышленности.

На основе полиуретанов получают всевозможные типы материалов и изделий: наполненные, армированные, вспененные, ламинированные, в виде плит, листов, блоков, профилей, волокон, пленок. Благодаря разнообразию форм, которые могут принимать полиуретаны — от мягких пенопластов до твердых материалов с различными свойствами, они применяются в производстве продукции для автомобильной и электронной промышленности, товаров бытового назначения, в составе изоляционных материалов и т. п.

Изделия и конструкции на основе полиуретанов широко применяются во всех отраслях промышленности без исключения [4–7], что обуславливает большую вероятность их использования в качестве объектов для поджога с применением инициаторов горения.

Полиуретаны относятся к материалам, на поверхности которых могут адсорбироваться инициаторы горения при поджогах. Исследование полиуретана в качестве объекта-носителя, на котором адсорбировались остатки ЛВЖ или ГЖ, позволит получить значимую информацию о причинах возникновения пожара.

Выбор в качестве объекта исследования полиуретана, широко применяемого для обивки автомобильных кресел, обусловлен тем фактором, что автомобили (в том числе автомобильные кресла) часто становятся объектами поджогов. Выбор дизельного топлива для исследования связан с частым применением его злоумышленниками в качестве средства поджога ввиду доступности и низкой стоимости.

При горении большинство полимерных материалов разлагается с выделением различных продук-

тов разложения. Полиуретаны не являются исключением. Выделяющиеся продукты горения могут повлиять на результаты определения следов и вида инициатора горения.

Актуальность темы исследования состоит в том, что мешающее влияние продуктов разложения полиуретана на идентификацию инициаторов горения, применяемых при поджоге, ранее не изучалось. Во всяком случае материалов о мешающем влиянии продуктов разложения полиуретана на результаты определения наличия и вида инициаторов горения не обнаружено.

Целью настоящей работы является исследование влияния продуктов термического разложения полиуретана на обнаружение и идентификацию инициаторов горения.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- изучение свойств полиуретана и его поведения в условиях пожара;
- изучение методов исследования инициаторов горения и выбор наиболее оптимального;
- исследование экстрактивных компонентов обугленных остатков полиуретана методом флуоресцентной спектроскопии.

В качестве объектов исследования использовались образцы полиуретана, применяемого для обивки автомобильных кресел, обработанные инициатором горения.

Материалы и методы

При проведении пожарно-технической экспертизы применяются различные методы исследования. Для обнаружения следов нефти и нефтепродуктов широко используются методы газовой, газожидкостной, тонкослойной хроматографии, инфракрасной, флуоресцентной спектроскопии, полевые методы исследования и др. [8–19].

Метод флуоресцентной спектроскопии является “быстрым, простым и, вместе с тем, очень чувствительным методом обнаружения легковоспламеняющихся и горючих жидкостей в объектах, изымаемых с мест пожара” [2, 3].

Способность нефти, отдельных нефтяных фракций и нефтепродуктов, например дизельного топлива, люминесцировать известна давно. Этот эффект активно используется не только в науке, но и в технике, медицине, экологии [12–22], например при обнаружении нефти и нефтяных пластов в геологии, нефтепродуктов (НП) в природных и сточных водах, исследовании лекарственных препаратов, производстве анализов в аналитических природоохранных лабораториях и т. п.

При длине волны возбуждающего света 255 нм в области 270–300 нм люминесцируют моноаромати-

ческие углеводороды (МАУ) — гомологи бензола, главным образом ди- и тризамещенные алкилбензолы; в области 300–330 нм — бициклические ароматические углеводороды (БАУ) — дифенил, гомологи нафталина, в том числе моно-, ди-, три- и тетразамещенные, и т. д. Длина волны флуоресценции ароматических углеводородов и ее интенсивность увеличиваются с возрастанием числа колец и сопряженных двойных связей [2, 3].

Из составных компонентов ЛВЖ (ГЖ) способностью флуоресцировать под действием ультрафиолетовых лучей обладают ароматические углеводороды: бициклические ароматические углеводороды, трициклические ароматические углеводороды (ТАУ), полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Возможна флуоресценция асфальтово-смолистых компонентов — продуктов пиролиза исходных ЛВЖ, а также объектов-носителей органической природы. К таким веществам и материалам относится дизельное топливо как инициатор горения и полиуретан как объект-носитель [2, 3].

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с методом, изложенным в [23].

Для исследования использовали полиуретан, предварительно нарезанный на образцы размером 50×50 мм (рис. 1).

Были подготовлены и испытаны образцы полиуретана без нанесения на поверхность дизельного топлива по три образца на каждый момент времени при заданной температуре и образцы, на поверхность которых было нанесено по 0,5 мл дизельного топлива по три образца на каждый момент времени при заданной температуре. Полученные образцы обжигались в муфельной печи (рис. 2) при температурах от 200 до 300 °С в течение 5, 10, 15 и 20 мин.

Обугленные остатки полиуретана (рис. 3) были отобраны для дальнейшего исследования методом флуоресцентной спектроскопии.

Подготовка проб для исследования проводилась путем растворения остатков ЛВЖ в подходящем для этой цели органическом растворителе (гексан). Гексан не способен флуоресцировать, поэтому его применяют при исследовании методом флуоресцентного анализа.



Рис. 1. Образец полиуретана



Рис. 2. Муфельная печь



Рис. 3. Обугленные образцы полиуретана после обжига при $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение: 1 — 5 мин; 2 — 10 мин; 3 — 15 мин; 4 — 20 мин



Рис. 4. Встряхивание измельченного образца с остатками инициатора горения



Рис. 5. Фильтрование экстрактов

Измельченный полиуретан (без инициатора и с инициатором горения) помещали в плоскодонную колбу с притертой пробкой и заливали минимально необходимым количеством гексана таким образом, чтобы проба была покрыта растворителем, и в течение примерно 0,5 ч подвергали встряхиванию (рис. 4).

Необходимой стадией подготовки проб является фильтрация подготовленных к исследованию экстрактов (рис. 5).

Спектрофлуориметрическое исследование анализируемых проб проводили на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама» (ТУ 4321-001-20506233-94). Анализируемые пробы в объеме 5 мкл с помощью микрошприца помещали в кювету вместимостью 3 мл, заполненную на 3/4 гексаном, и перемешивали. Условия съемки спектров флуоресценции были следующими: спектральный диапазон измерений — 270–450 нм, длина волны возбуждения — 255 нм, шаг сканирования — 1 нм, число вспышек — 25, чувствительность — низкая.

Результаты исследования и их обсуждение

Для того чтобы выделить области основных максимумов спектра флуоресценции, необходимо найти по табл. 7 ([23], с. 51) комбинацию областей максимумов флуоресценции, характерную для спектра флуоресценции исследуемого объекта, и отнести анализируемый объект к соответствующему этой комбинации классу (разновидности) ЛВЖ или ГЖ.

На рис. 6 представлен спектр, на котором наблюдается интенсивный пик в области 270–290 нм, в которой люминесцируют МАУ. Интенсивность флуоресценции составляет 0,15 отн. ед. Указанный пик при данной интенсивности соответствует спектру флуоресценции чистого гексана.

На рис. 7 представлен спектр флуоресценции дизельного топлива, в котором наблюдается максимум в области 300–330 нм. Наличие данного пика свидетельствует о присутствии в пробе бициклических ароматических углеводородов, например дифенила и гомологов нафталина. Интенсивность флуоресценции составляет 21 отн. ед.

Спектр флуоресценции полиуретана, не подвергнувшегося термическому воздействию, приведен на рис. 8.

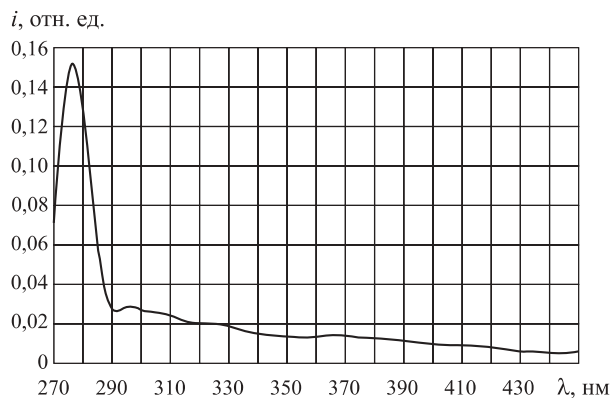


Рис. 6. Спектр флуоресценции чистого гексана: λ — длина волны, нм; i — интенсивность флуоресценции

На рис. 9 представлен спектр флуоресценции обугленного образца полиуретана после обжига при температуре 200 °С в течение 5 мин.

Изучение спектров, представленных на рис. 8 и 9, показало следующее. В спектре образца чистого полиуретана (см. рис. 8) наблюдается пик максимальной флуоресценции в области 370–385 нм, в которой люминесцируют ТАУ (например, фенантрен). В спектре обугленного образца полиуретана (см. рис. 9) наблюдается плечо максимальной флуоресценции в обла-

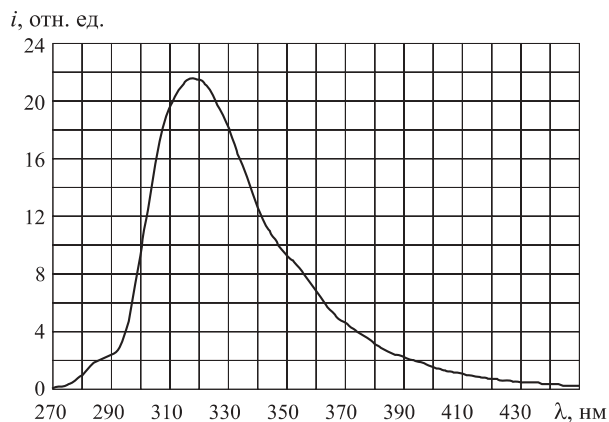


Рис. 7. Спектр флуоресценции дизельного топлива

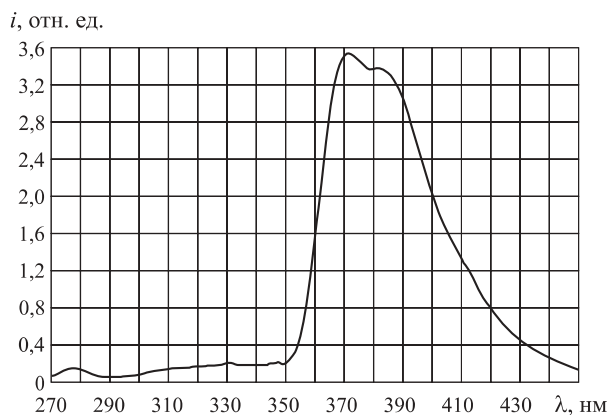


Рис. 8. Спектр флуоресценции чистого полиуретана при комнатной температуре

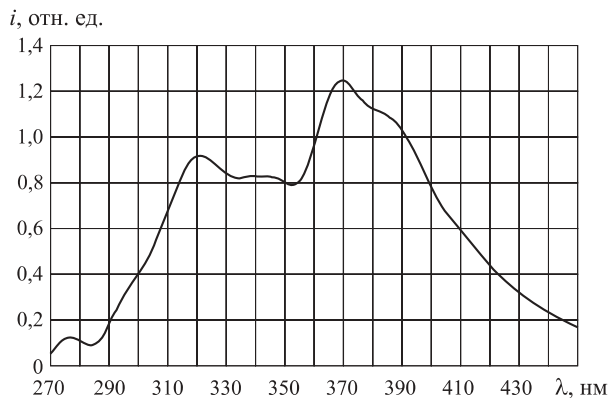


Рис. 9. Спектр флуоресценции обугленного полиуретана после обжига при $t = 200$ °С в течение 5 мин

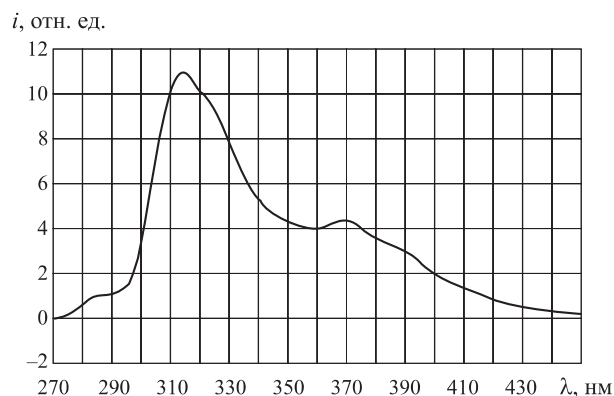


Рис. 10. Спектр образца обугленного полиуретана с дизельным топливом после обжига при $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5 мин

сти 310–330 нм, соответствующей люминесценции БАУ, и пики максимальной флуоресценции в области 360–380 нм, характерной для люминесценции ТАУ. Интенсивность флуоресценции в спектре чистого полиуретана (см. рис. 8) составляет 3,6 отн. ед., в спектре обугленного полиуретана (см. рис. 9) — 1,25 отн. ед. Полученные результаты свидетельствуют об уменьшении содержания ТАУ и появлении БАУ в спектре обугленного полиуретана (см. рис. 9).

На рис. 10 показан спектр флуоресценции образца полиуретана с нанесенным на него дизельным топливом после обжига при температуре $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5 мин.

В спектре обугленного образца полиуретана с дизельным топливом (см. рис. 10) наблюдаются пики максимальной флуоресценции в области 300–330 нм, соответствующей люминесценции БАУ, в области 360–380 нм, характерной для люминесценции ТАУ, и пик небольшой интенсивности в области 285 нм, характерной для люминесценции МАУ. Интенсивность флуоресценции в спектре на рис. 9 составляет 1,25 отн. ед., в спектре на рис. 10 — 11 отн. ед., что свидетельствует об увеличении содержания БАУ и уменьшении ТАУ в спектре на рис. 10. Согласно табл. 7 ([23], с. 51) обнаруженные в спектре на рис. 10 пики флуоресценции в области БАУ и ТАУ позволяют идентифицировать инициатор горения как сильно выгоревшее дизельное топливо.

На рис. 11 представлены спектры флуоресценции образцов полиуретана, не содержащих дизельное топливо и обработанных им, после нагревания в муфельной печи в течение 10 мин при температуре $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

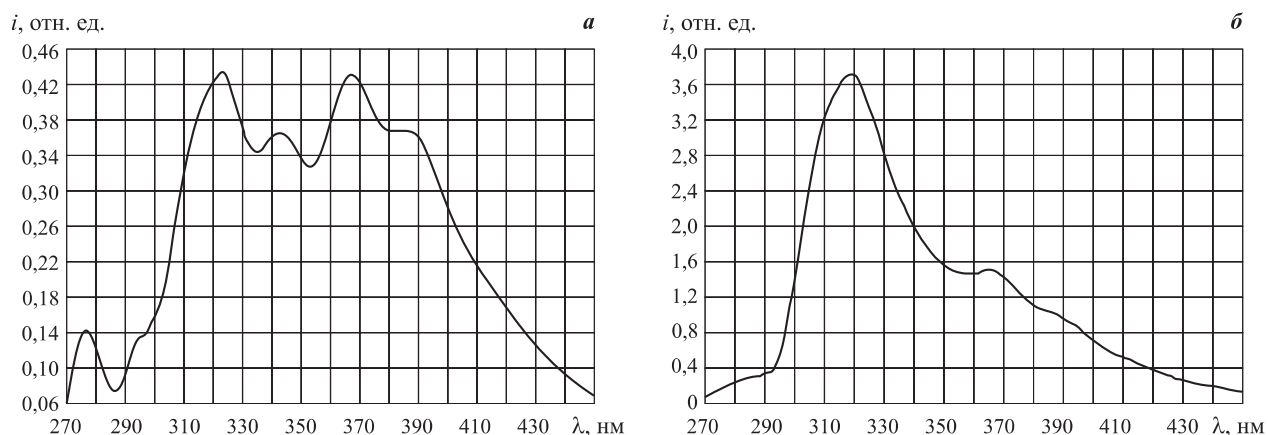


Рис. 11. Спектр флуоресценции обугленного полиуретана чистого (а) и с дизельным топливом (б) после обжига при $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 10 мин

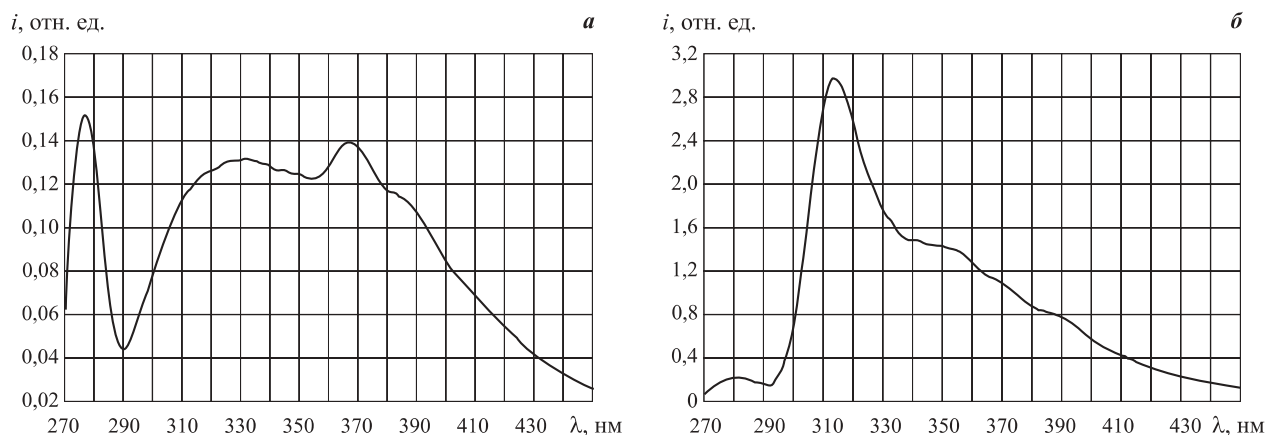


Рис. 12. Спектр флуоресценции обугленного полиуретана чистого (а) и с дизельным топливом (б) после обжига при $t = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 20 мин



Рис. 13. Вспышка при нагревании полиуретана

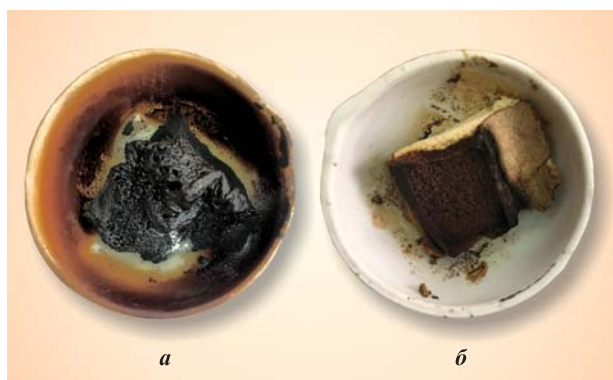


Рис. 14. Образец полиуретана после обжига при температуре 500 °С в течение 3 мин: а — с дизельным топливом; б — без дизельного топлива

В спектре обугленного полиуретана (см. рис. 11,а) наблюдаются пики максимальной флуоресценции в областях 315–330 и 335–355 нм, соответствующих люминесценции БАУ, а также в области 360–380 нм, характерной для люминесценции ТАУ.

В спектре обугленного полиуретана с дизельным топливом (рис. 11,б) наблюдаются пики максимальной флуоресценции в области 310–325 нм, в которой люминесцируют БАУ, и в области 360–375 нм, характерной для люминесценции ТАУ. Интенсивность флуоресценции в спектре на рис. 11,а составляет 0,44 отн. ед., в спектре на рис. 11,б — 3,7 отн. ед., что свидетельствует об увеличении содержания БАУ и уменьшении ТАУ в спектре обугленного полиуретана с дизельным топливом. Обнаруженные в спектре на рис. 11,б пики флуоресценции в области БАУ и ТАУ позволяют идентифицировать инициатор горения как сильно выгоревшее дизельное топливо ([23], с. 51, табл. 7).

Спектры флуоресценции образцов полиуретана, необработанных и обработанных дизельным топливом, после обжига при температуре 250 °С в течение 20 мин представлены на рис. 12.

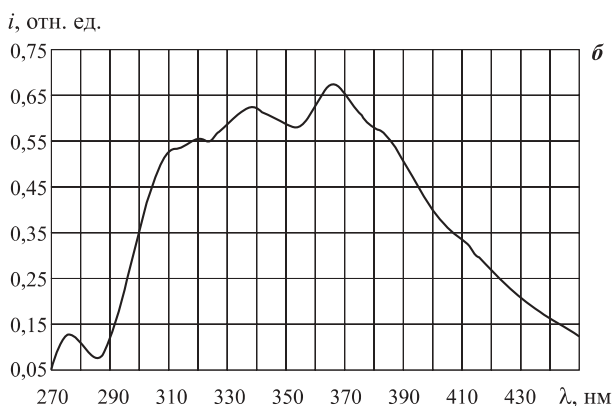
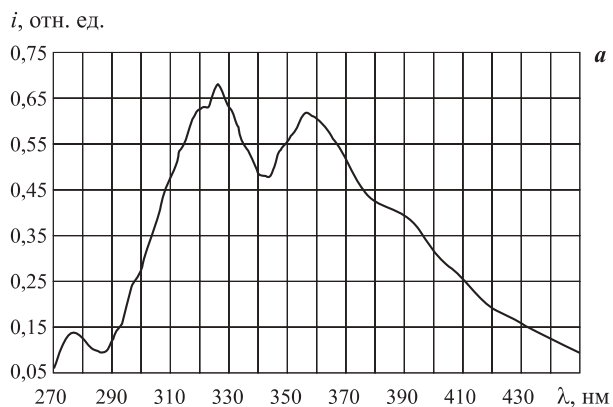


Рис. 15. Спектр обугленного полиуретана чистого (а) и с дизельным топливом (б) после обжига при температуре 500 °С в течение 3 мин

В спектре флуоресценции обугленного полиуретана (рис. 12,а) наблюдаются пики в области 315–345 нм, соответствующей люминесценции БАУ, и в области 360–375 нм, характерной для люминесценции ТАУ. Интенсивность флуоресценции составляет 0,15 отн. ед. Так как интенсивность флуоресценции ниже 0,25 отн. ед., данный результат, как считается, относится к фоновым загрязнениям.

В спектре флуоресценции обугленного полиуретана с дизельным топливом (рис. 12,б) наблюдаются пики максимальной флуоресценции в области 310–325 нм, в которой люминесцируют БАУ, и в области 340–375 нм, характерной для люминесценции ТАУ. Интенсивность флуоресценции в спектре на рис. 12,а составляет 0,15 отн. ед., в спектре на рис. 12,б — 3,0 отн. ед., что свидетельствует об увеличении количества БАУ и уменьшении ТАУ в спектре на рис. 12,б. Согласно табл. 7 [23] обнаруженные в спектре на рис. 12,б пики флуоресценции в области БАУ и ТАУ позволяют идентифицировать инициатор горения как сильно выгоревшее дизельное топливо.

При нагревании образцов полиуретана с дизельным топливом при температуре 300 °С через 3 мин внутри муфельной печи произошла вспышка, которая сопровождалась несколькими хлопками, темпе-

ратура резко увеличилась до 500 °С (рис. 13), произошло самовоспламенение паров дизельного топлива и продуктов горения полиуретана. Полиуретан выгорел с образованием пористого остатка черного цвета.

На рис. 14 показаны образцы полиуретана без добавок дизельного топлива и с добавкой инициатора горения после выдержки в муфельной печи при 500 °С в течение 3 мин.

Анализ полученных спектров (рис. 15) показывает следующее.

В спектре флуоресценции обугленного полиуретана (см. рис. 15,а) наблюдаются пики в области 315–335 нм, в которой люминесцируют БАУ, и в области 350–370 нм, характерной для люминесценции ТАУ. Интенсивность флуоресценции составляет соответственно 0,68 и 0,63 отн. ед.

В спектре обугленного полиуретана с дизельным топливом (рис. 15,б) наблюдаются пики в области 310–340 нм, в которой люминесцируют БАУ, и в области 360–375 нм, характерной для люминесценции ТАУ, которые также наблюдаются в спектре полиуретана. Максимальная интенсивность флуоресценции при этом составляет соответственно 0,6 и 0,68 отн. ед. Таким образом, при сравнении спектров флуоресценции, представленных на рис. 15, можно

сделать вывод, что идентифицировать инициатор горения как дизельное топливо в этом случае не представляется возможным.

Выводы

1. Анализ полученных результатов исследований показал, что при нагревании образцов полиуретана до 250 °С включительно и выдержке в муфельной печи в течение 5, 10, 15 и 20 мин возможна идентификация инициатора горения как сильно выгоревшего дизельного топлива.

2. При нагревании образцов полиуретана до температуры выше 250 °С идентификация инициатора горения как сильно выгоревшего дизельного топлива невозможна.

3. При нагревании образцов полиуретана с дизельным топливом до температуры 250 °С продукты разложения полиуретана не мешают идентификации инициатора горения.

4. При нагревании образцов полиуретана с дизельным топливом до 300 °С происходит воспламенение образцов с резким повышением температуры до 500 °С. По полученным спектрам флуоресценции установить инициатор горения в данном случае не представляется возможным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2016 году : стат. сб. / Под общ. ред. Д. М. Гордиенко. — М. : ВНИИПО, 2017. — 124 с.
2. Чешко И. Д., Галишев М. А., Шарапов С. В., Кривых Н. Н. Техническое обеспечение расследования поджогов, совершенных с применением инициаторов горения. — М. : ВНИИПО, 2002. — 120 с.
3. Воронцова А. А., Калашиников Д. В., Липский А. А., Эсатов О. А. Проблемы и перспективы использования пожарно-техническими специалистами современных способов обнаружения и исследования средств для поджога // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. — 2017. — № 2. — С. 72–77. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29344433_42880380.pdf (дата обращения: 07.02.2019).
4. Балакин В. М., Галлямов А. А., Гарифуллин Д. Ш., Абдуллина К. Д. Фосфорсодержащие антипирены для древесины на основе продуктов аминолитиза полиуретанов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 8(145). — С. 98–105. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_20214763_82156503.pdf (дата обращения: 05.02.2019).
5. Ксенофонтов М. А. Пенополиуретаны. Структура и свойства // Вестник БГУ. Сер. 1: Физика. Математика. Информатика. — 2011. — № 3. — С. 48–52. URL: <http://www.elib.bsu.by/bitstream/123456789/29937/1/48-52.pdf> (дата обращения: 05.02.2019).
6. Дмитриенко С. Г., Аняри В. В. Пенополиуретаны. Сорбционные свойства и применение в химическом анализе. — М. : URSS, 2010. — 264 с.
7. Бесчастных А. Н., Чешко И. Д., Андреева Е. Д., Сиротинкин Н. В. Экспертное исследование после пожара остатков пенополиуретанов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2004. — Т. 13, № 1. — С. 80–86.
8. Хроматографические методы в экспертизе пожаров. URL: <https://poznayka.org/s87402t1.html> (дата обращения: 10.02.2019).
9. Bonetti J., Quarino L. Comparative forensic soil analysis of New Jersey State Parks using a combination of simple techniques with multivariate statistics // Journal of Forensic Sciences. — 2014. — Vol. 59, No. 3. — P. 627–636. DOI: 10.1111/1556-4029.12375.
10. Шеков А. А., Плотникова Г. В. Факторы, влияющие на обнаружение и идентификацию индикаторов горения методом газовой хроматографии // Эксперт-криминалист. — 2019. — № 1. — С. 36–38.

11. *Fettig I., Krüger S., Deubel J. H., Werrel M., Raspe T., Piechotta C.* Evaluation of a headspace solid-phase microextraction method for the analysis of ignitable liquids in fire debris // *Journal of Forensic Sciences*. — 2014. — Vol. 59, No. 3. — P. 743–749. DOI: 10.1111/1556-4029.12342.
12. *Захаров А. А., Сошина Н. Л., Нагорный Р. В.* Применение метода флуоресцентной спектроскопии и газожидкостной хроматографии для установления причин пожаров // *Auditorium*. — 2017. — № 3(15). — С. 97–103. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_30450106_11677834.pdf (дата обращения: 01.02.2019).
13. *Илларионова Е. А., Сыроватский И. П.* Метод флуориметрии. Применение в фармацевтическом анализе. — Иркутск : ИГМУ, 2017. — 41 с.
14. *Ueno T., Nagano T.* Fluorescent probes for sensing and imaging // *Nature Methods*. — 2011. — Vol. 8, Issue 8. — P. 642–645. DOI: 10.1038/nmeth.1663.
15. *Клантюк И. В., Чешко И. Д.* Обнаружение следов светлых нефтепродуктов на месте пожара при поджогах // *Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС службы МЧС России*. — 2012. — № 3. — С. 38–43.
16. *Беккер Ю.* Спектроскопия / Пер. с нем. — М. : Техносфера, 2009. — 528 с.
17. *Wysocki L. M., Lavis L. D.* Advances in the chemistry of small molecule fluorescent probes // *Current Opinion in Chemical Biology*. — 2011. — Vol. 15, Issue 6. — P. 752–759. DOI: 10.1016/j.cbpa.2011.10.013.
18. *Chen X., Pradhan T., Wang F., Kim J. S., Yoon J.* Fluorescent chemosensors based on spiroring-opening of xanthenes and related derivatives // *Chemical Reviews*. — 2012. — Vol. 112, Issue 3. — P. 1910–1956. DOI: 10.1021/cr200201z.
19. *Grimm J. B., Heckman L. M., Lavis L. D.* The chemistry of small-molecule fluorogenic probes // *Progress in molecular biology and translational science* / May C. M. (ed.). — USA : Academic Press, 2013. — Vol. 113. — P. 1–34. DOI: 10.1016/B978-0-12-386932-6.00001-6.
20. *Boens N., Leen V., Dehaen W.* Fluorescent indicators based on BODIPY // *Chemical Society Reviews*. — 2012. — Vol. 41, Issue 3. — P. 1130–1172. DOI: 10.1039/c1cs15132k.
21. *Drummen G. P. C.* Fluorescent probes and fluorescence (microscopy) techniques — Illuminating biological and biomedical research // *Molecules*. — 2012. — Vol. 17, Issue 12. — P. 14067–14090. DOI: 10.3390/molecules171214067.
22. *Ettinger A., Wittmann T.* Fluorescence live cell imaging // *Methods in Cell Biology* / Wilson L., Tran P. (eds.). — USA : Academic Press, 2014. — Vol. 123. — P. 77–94. DOI: 10.1016/b978-0-12-420138-5.00005-7.
23. *Чешко И. Д., Принцева М. Ю., Яценко Л. А.* Обнаружение и установление состава легковоспламеняющихся и горючих жидкостей при поджогах : метод. пособие. — М. : ВНИИПО, 2010. — 90 с.

Поступила 07.02.2019; после доработки 25.03.2019; принята к публикации 29.03.2019

Информация об авторах

ПЛОТНИКОВА Галина Викторовна, канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры пожарно-технической экспертизы, Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: plotnikovagv@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Константин Леонидович, канд. хим. наук, начальник Судебно-экспертного учреждения Федеральной противопожарной службы “Испытательная пожарная лаборатория” по Иркутской области, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: kuznets84@inbox.ru

МАЛЫШЕВА Светлана Филипповна, д-р хим. наук, ведущий научный сотрудник, Иркутский институт химии им. А. Е. Фаворского СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: mal@irioch.irk.ru