

УДК: 614.84:678

DOI 10.48612/ntp/r364-d8n9-7r28

ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВНЕШНЕГО ОГНЕЗАЩИТНОГО СЛОЯ ОБОЛОЧЕК ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛАСТИЧНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

А. Е. ЗАХАРОВ

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
E-mail: frzakhsach@mail.ru

В статье рассматривается термогравиметрическое поведение наномодифицированного полимерного материала, предназначенного для внешнего огнезащитного слоя оболочек полимерных эластичных резервуаров (ПЭР). Материал представляет собой полимерный композиционный слой на основе промышленной клеевой системы TIP TOP SOLUTION MTR с 10 мас.% наноуглеродного наполнителя типа «астрален» и рассматривается как потенциальный элемент, компенсирующий недостаточную термостабильность базового термопластичного полиуретана оболочки ПЭР. Исследование термического поведения выполнено методами термогравиметрического анализа (ТГ), дифференциального термогравиметрического анализа (ДТГ) и дифференциального термического анализа (ДТА) в окислительной атмосфере в соответствии с ГОСТ Р 53293–2009 и методическими рекомендациями по термоанализу полимеров. Проанализированы температура начала интенсивной потери массы ($T_{нач}$), характерные температуры разложения (T_{10} , T_{50}), экстремумы скорости деструкции и величина остатка при высоких температурах. Показано, что введение 10 мас.% астралена приводит к смещению характерных температур разложения в область более высоких значений, снижению пиковых скоростей потери массы и небольшому увеличению углеродистого остатка. Полученные результаты свидетельствуют о повышении термостабильности модифицированного материала и позволяют рассматривать его как перспективный элемент конструктивной огнезащиты оболочек ПЭР, способствующий снижению риска каскадного развития пожара при аварийном проливе нефти и нефтепродуктов.

Ключевые слова: полимерные эластичные резервуары; термопластичный полиуретан; TIP TOP SOLUTION MTR; наноуглеродный наполнитель; астрален; термогравиметрический анализ; термостабильность; огнестойкость; пожарная безопасность.

THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS OF A NANOMODIFIED MATERIAL FOR THE EXTERNAL FIRE-PROTECTIVE LAYER OF POLYMER FLEXIBLE RESERVOIR SHELLS

A. E. ZAKHAROV

Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
Russian Federation, Saint Petersburg
E-mail: frzakhsach@mail.ru

The article examines the thermogravimetric behavior of a nanomodified polymer material intended for the external fire-protective layer of polymer flexible reservoir shells (PFRs). The material is a polymer composite layer based on the industrial adhesive system TIP TOP SOLUTION MTR with 10 wt.% of a nanocarbon filler of the "astralene" type and is considered as a potential element to compensate for the insufficient thermal stability of the base thermoplastic polyurethane shell of PFRs. The thermal behavior was studied using thermogravimetric analysis (TGA), differential thermogravimetric analysis (DTG) and differential thermal analysis (DTA) in an oxidizing atmosphere in accordance with GOST R 53293–2009 and methodological guidelines on the thermal analysis of polymer materials. The temperature of the onset of intensive mass loss (T_{onset}), characteristic decomposition temperatures (T_{10} , T_{50}), extrema of the degradation rate and the amount of residue at elevated temperatures were analyzed. It is shown that the introduction of 10 wt.% astralene shifts the characteristic decomposition temperatures to higher values, reduces the peak mass-loss rates and leads to a slight increase in the carbonaceous residue. The results indicate an increase in the thermal stability of the modified material and allow it to be considered as a promising element of structural fire protection for PFR

shells, contributing to a reduction in the risk of cascading fire development in the event of an accidental spill of oil and petroleum products.

Keywords: polymeric elastic reservoirs; thermoplastic polyurethane; TIP TOP SOLUTION MTR; nanocarbon filler; astralen; thermogravimetric analysis; thermal stability; fire resistance; fire safety.

Введение

Полимерные эластичные резервуары (ПЭР), применяемые для хранения нефти и нефтепродуктов, представляют собой конструкции, в которых несущая и герметизирующая функция обеспечивается оболочкой из термопластичного полиуретана (ТПУ) и вспомогательными полимерными слоями. При пожаре пролива именно оболочка ПЭР первой воспринимает тепловое воздействие пламени, и её термостабильность во многом определяет вероятность разгерметизации резервуара и вовлечения в горение соседних ёмкостей. По данным обобщающих исследований горения полимерных материалов и термодеструкции полиуретанов, термопластичные полиуретаны относятся к группе легко горючих материалов, характеризуются сравнительно невысокой термической стойкостью, высокой скоростью образования летучих продуктов пиролиза и ограниченной способностью к формированию при нагреве сплошного коксового слоя на поверхности, который мог бы выполнять функции теплового барьера [1, 3–6, 8]. Это означает, что незащищённая оболочка из ТПУ является уязвимым элементом системы хранения моторных топлив в условиях пожара пролива.

В проводимых исследованиях, посвящённых снижению пожарной опасности при использовании ПЭР для хранения нефти и нефтепродуктов, было показано, что модификация полимерных композитов углеродной наноструктурой типа «астрален» в диапазоне концентраций до 10 мас.% приводит к увеличению остаточной массы при термогравиметрическом анализе и может способствовать уменьшению пожарной опасности таких резервуаров [10–12, 14]. Эти данные подтверждают целесообразность применения наноуглеродных наполнителей для повышения термостойкости материалов, используемых в конструкциях ПЭР.

Одним из перспективных подходов к повышению термостабильности и снижению горючести полимерных материалов является введение наноуглеродных структур [4, 5, 7–9]. Показано, что дисперсные наноуглеродные наполнители способны изменять кинетику термоокислительной деструкции, смещать характерные температуры разложения в область более высоких значений и приводить к увеличению выхода и плотности коксового остатка, формирующегося при термическом воздействии и работающего как тепло- и массообменный барьер [3–

5, 7–10]. При этом выраженность этих эффектов существенно зависит от конкретной полимерной матрицы, способа введения наполнителя и режима нагрева, что делает необходимой экспериментальную проверку влияния наноуглеродных добавок на материалы оболочек ПЭР.

В настоящей работе исследуется полимерный композиционный материал на основе промышленной клеевой системы TIP TOP SOLUTION MTR, модифицированный углеродным наноструктурным наполнителем типа «астрален» в количестве 10 мас.% (далее – модифицированный полимерный материал). Материал предназначен для нанесения на внешнюю поверхность оболочек ПЭР и может рассматриваться как потенциальный материал внешнего огнезащитного слоя, призванный компенсировать недостаточную огнестойкость базовой оболочки из ТПУ за счёт повышения её термостойкости в условиях пожара пролива [9–11, 13, 14]. Оценка термического поведения выполнена методом комплексного термического анализа (ТГ/ДТГ/ДТА) в соответствии с требованиями ГОСТ Р 53293–2009 «Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа» и методическими рекомендациями по термическому анализу полимерных материалов [2]. Цель исследования — количественно охарактеризовать параметры терморазложения исследуемого наномодифицированного материала ($T_{нач}$, T_{10} , T_{50} , величина остатка при высоких температурах) и оценить, в какой мере модификация астраленом может использоваться как инструмент повышения огнестойкости оболочки ПЭР и снижения риска каскадного развития пожара по сравнению с конструкцией, в которой оболочка ПЭР выполнена только из ТПУ и не имеет внешнего модифицированного слоя.

Материалы и методика

Объект исследования

В полимерный композиционный материал на основе клеевой системы TIP TOP SOLUTION MTR был введён наноуглеродный наполнитель типа «астрален» в количестве 10 мас.% от массы клеевой основы [9–11]. Материал рассматривается как потенциальный элемент многослойной конструкции ПЭР (усиливающий защитный слой) [12, 14].

Условия эксперимента

Термоанализ выполнен на комбинированном приборе типа NETZSCH STA 449 в режиме одновременной регистрации ТГ, ДТГ и ДТА при следующих условиях:

– атмосфера: воздух (окислительные условия, имитирующие реальную эксплуатацию и пожар);

– температурный диапазон: от комнатной температуры до 1100 °С;

– скорость нагрева: 10 К/мин;

– начальная навеска образца: $m_0 \approx 107$ мг;

– тигли: Al_2O_3 .

Обработка результатов

Обработка результатов выполнялась в соответствии с ГОСТ Р 53293–2009 и методическими рекомендациями по термическому анализу полимеров [2].

В частности:

– температура начала интенсивной потери массы $T_{нач.}$ определялась по касательной к ТГ-кривой (переход от «пологого» участка к участку скоростной убыли массы);

– максимумы скорости потери массы $T_{пик.}$ фиксировались по экстремумам ДТГ-кривой;

– площади и параметры пиков ДТА (начало, максимум, конец, ширина, высота) оценивались по данным программного обеспечения прибора;

– для количественной оценки были выделены три стадии разложения с расчётом ступенчатых потерь массы Δm и остатка при 1099–1100 °С;

– дополнительно определялись характерные температуры при 10, 50 и 90 % потери массы (T_{10} , T_{50} , T_{90}), а также строился ступенчатый баланс массы по стадиям разложения.

Результаты термогравиметрического анализа показали следующее:

1. Кривые ТГ/ДТГ/ДТА модифицированного материала

ТГ-кривая модифицированного полимерного композиционного материала показывает стабильность массы вплоть до 340 °С. По критерию касательных и изменению формы ТГ/ДТГ температура начала интенсивного разложения оценивается как: $T_{нач} \approx 342$ °С.

Дальнейшее разложение протекает по трёхстадийной схеме с отчётливыми особенностями на ДТГ и ДТА.

На рис. 1 показаны ТГ (масса–температура), ДТГ (скорость потери массы) и ДТА (тепловой эффект). Видны три стадии разложения и два основных экзотермических комплекса.

Анализ ТГ/ДТГ показывает, что разложение удобно описывать в виде трёх стадий с привязкой к массовым уровням 100, 60, 40 и 2,24 % от начальной массы.

Таблица 1. Температуры при заданной остаточной массе модифицированного полимерного композиционного материала (10 мас.% астралена)

Остаточная масса, %	Потеря массы, %	Температура, °С
95	5	336,0
90	10	350,6
80	20	366,4
70	30	381,0
60	40	405,7
50	50	485,6
40	60	619,5
30	70	734,5
20	80	848,8

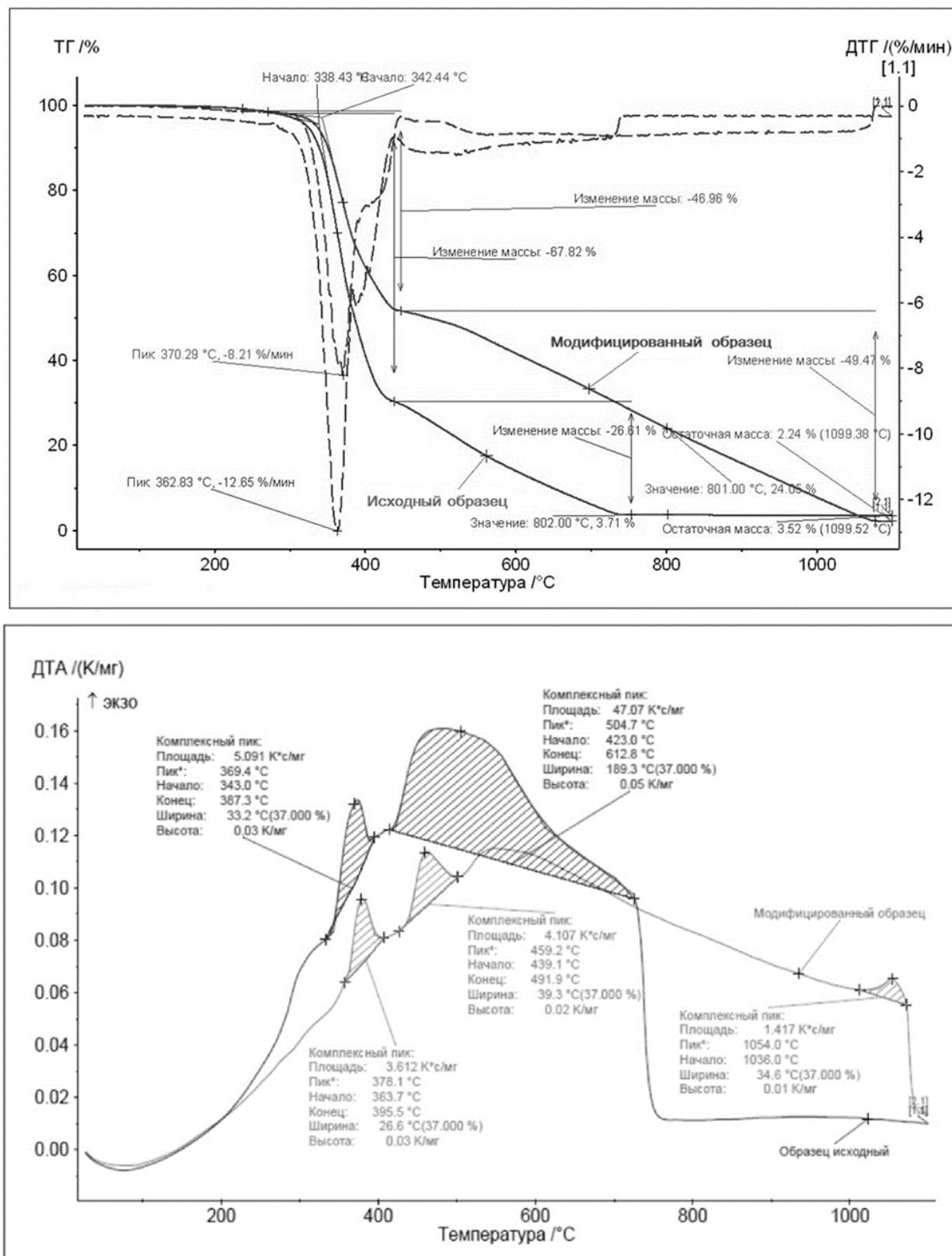


Рис. 1. ТГ/ДТГ/ДТА-кривые полимерного композиционного материала (TIP TOP SOLUTION MTR с 10 мас.% астралена)

Таблица 2. Стадии термического разложения модифицированного полимерного композиционного материала (10 мас.% астралена)

Стадия	Температурный диапазон, °С	Масса в начале, %	Масса в конце, %	Потеря массы Δm (% , мг)	Краткая характеристика стадии (реакция разрушения)
1	342–405,7	100	60	40,00 % ($\approx 42,8$ мг)	Начальная термоокислительная деструкция органической полимерной матрицы и летучих компонентов.
2	405,7–619,5	60	40	20,00 % ($\approx 21,4$ мг)	Дальнейшее разрушение поперечно-сшитой структуры и интенсивное окисление углеродсодержащего остатка (основная экзотермическая стадия).
3	619,5–1099	40	2,24	37,76 % ($\approx 40,4$ мг)	Догорание и медленное окисление углеродистого остатка и неорганических примесей, формирование небольшого минерального остатка.

Из табл. 2 для стандартных показателей термостабильности полимеров принимаем:

- T_{10} (10 % потери массы, 90 % остатка) $\approx 350,6$ °С;
- T_{50} (50 % потери массы) – по точке 50 % остатка $\approx 485,6$ °С;
- $T_{80} \approx 848,8$ С;

– T_{90} (90 % потери массы) – по интерполяции на конечном участке между 20 % (848,8 °С) и 2,24 % (1099 °С)

Введение 10 мас. % астраленов смещает температуру 50-процентной потери массы примерно на 80–100 °С вверх, что свидетельствует о росте термостабильности композиции в среднем температурном диапазоне.

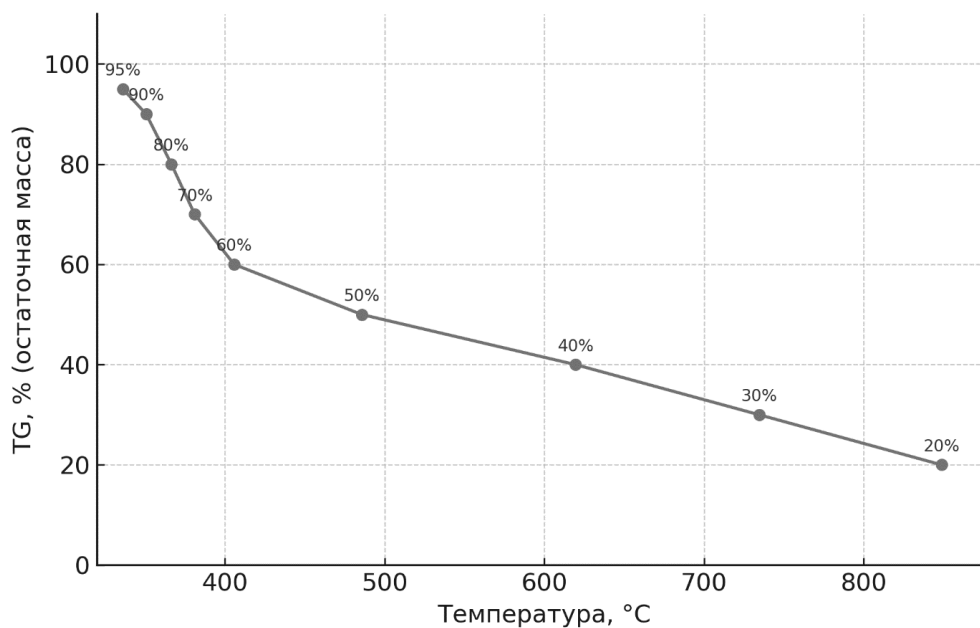


Рис. 2. Температурные точки T_5 , T_{10} , T_{20} , ..., T_{80} для модифицированного полимерного материала по ТГ-кривой

Графически на рис. 2 видно, при каких температурах достигаются заданные уровни остаточной массы (95–20 %), что наглядно показывает смещение характеристических температур разложения модифицированного полимерного материала. Сопоставление этих данных с результатами термогравиметрического анализа исходного полимерного композиционного материала на основе TIP TOP SOLUTION MTR (без добавки астралена), проведённого в

аналогичных условиях, показывает, что для модифицированного материала точки T_{10} , T_{50} и T_{80} систематически смещены в область более высоких температур. При этом общая форма ТГ-кривой и трёхстадийная схема разложения сохраняются, что указывает на сохранение характерного механизма терморазрушения полимерной матрицы при одновременном увеличении её термического запаса устойчивости.

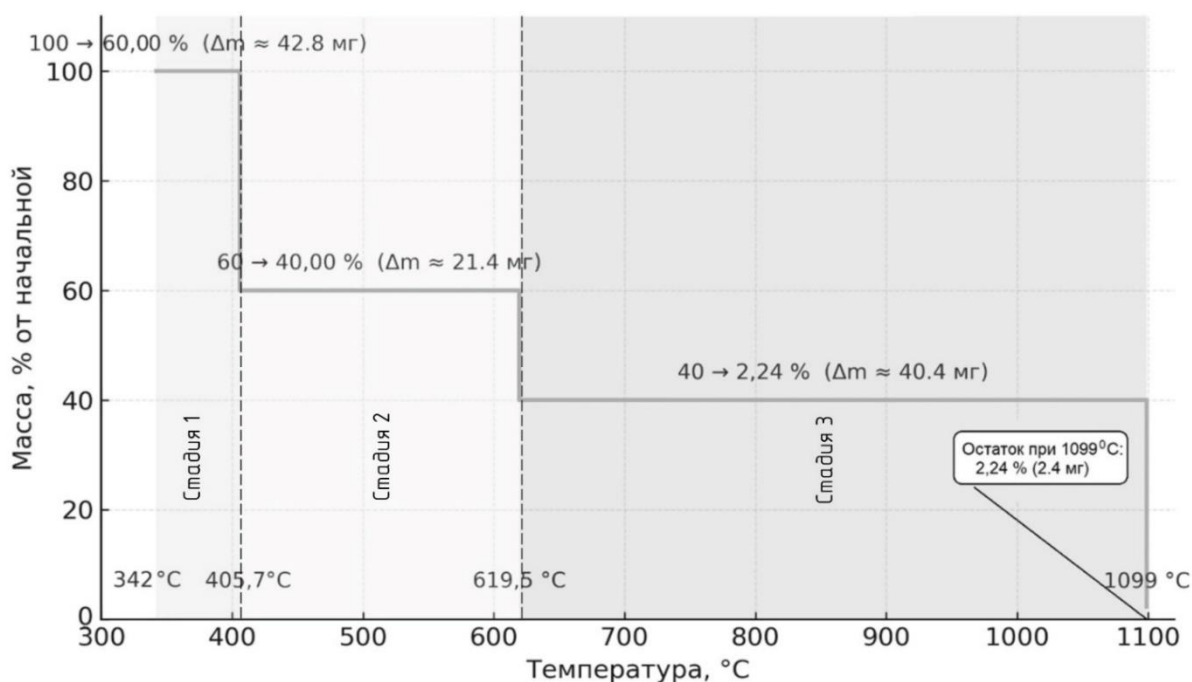


Рис. 3. Лестничная диаграмма термогравиметрического анализа стадий потери массы модифицированного полимерного композиционного материала (10 мас.% астралена).

Лестничная диаграмма (рис. 3) также демонстрирует, что температурные границы стадий разложения для модифицированного материала сдвинуты вверх по шкале температур по сравнению с исходным полимерным материалом: основная ступень потери массы реализуется при более высоких температурах, а остаток при 1099 °C несколько выше. Таким образом, введение 10 мас.% астралена не меняет качественно последовательность стадий разложения, но приводит к более «термостойкому» распределению этих стадий, что подтверждает влияние наноглеродного наполнителя именно на термостабильность полимерного компонента.

Обсуждение термостабильности модифицированного полимерного материала

1. *Смещение температур начала и средней стадии разложения.* Для модифицированного материала начало интенсивной потери

массы фиксируется при $T_{нач} \approx 342$ °C, а температура 10 %-ной потери массы составляет $T_{10} \approx 350,6$ °C. Эти значения заметно превышают типичный интервал начала интенсивной термоокислительной деструкции термопластичных полиуретанов, который по литературным данным лежит приблизительно в области 280–320 °C [1, 4, 5–7]. Таким образом, введение астраленов указанной выше концентрации в клеевую композицию обеспечивает увеличение температурного запаса исследуемого образца порядка 30–40 °C относительно базового полиуретанового уровня, что следует рассматривать как положительный эффект с точки зрения повышения термостабильности материала в докритическом для конструкции диапазоне температур.

2. *Поведение в зоне «средних» температур.* Температура 50 %-ной потери массы для модифицированного материала достигает $T_{50} \approx 485,6$ °C, что существенно выше

диапазона, в котором, согласно обобщающим данным по термодеструкции полиуретанов, завершается основная стадия разложения (как правило, при температурах ниже 420–430 °С [1, 4, 6, 7]). Это позволяет говорить о смещении «середины» диапазона разрушения в область более высоких температур на 60–80 °С. С инженерной точки зрения такой сдвиг означает, что при одинаковом тепловом воздействии модифицированный композиционный материал дольше сохраняет значительную долю массы и, соответственно, потенциально дольше поддерживает работоспособность защитного слоя в составе многослойной оболочки.

3. Экзотермические процессы и вклад углеродного наполнителя. На ДТА для модифицированного материала наблюдается два экзотермических комплекса, причём второй (с максимумом около 505 °С, началом около 423 °С и завершением около 613 °С) имеет большую площадь и высоту. Это указывает на выраженное окисление углеродсодержащего остатка и активное тепловыделение в диапазоне 400–600 °С. С точки зрения пожарной опасности это не даёт эффекта пассивной «угольной защиты», но подтверждает перераспределение тепловых процессов и более поздний характер основного разложения по сравнению с типичными термопластичными полиуретанами [1, 4–7].

4. Угольный остаток. Остаток около 2,24 % при 1099 °С остаётся низким и не обеспечивает мощной теплоизоляции, способной существенно экранировать тепловой поток, что соответствует представлениям о роли развитого коксового слоя как основного теплоизолирующего барьера в системах конструктивной огнезащиты полимерных материалов [3, 4, 8]. Однако само смещение начала и середины разложения в область более высоких температур означает, что материал выдерживает большее тепловое воздействие до перехода в критическое состояние.

5. Влияние астралена на полимерную матрицу. Сопоставление результатов термогравиметрического анализа модифицированного материала с данными для исходного полимерного композиционного материала TIP TOP SOLUTION MTR (без астралена), полученными в тех же условиях, показывает, что введение 10 мас.% наноуглеродного наполнителя приводит к смещению температур начала интенсивного разложения и 50 %-ной потери массы в область более высоких значений, а также к некоторому увеличению остатка при 1099 °С. При этом трёхстадийный характер разложения полимерной матрицы сохраняется. Указанные изменения свидетельствуют о том, что астрален в данном случае выступает не просто инертным наполнителем, а повышает термостабильность

полимерного компонента, что согласуется с механизмами влияния углеродных наноструктур, описанными в литературе [4, 5, 7–11].

С точки зрения сценария пожара пролива это означает:

- при одинаковом тепловом потоке верх ПЭР, усиленный или защищённый модифицированным слоем, резервуар сможет дольше оставаться работоспособным до разрушения;
- критический интервал, в котором оболочка начинает массово терять прочность и целостность, смещается в область более высоких температур и, соответственно, более жёстких режимов пожара [12–14];
- даже при ограниченной карбонизации материала само увеличение термостабильности в «рабочем» диапазоне температур даёт запас времени для тушения, охлаждения и предотвращения каскадного вовлечения соседних ПЭР.

Оценка огнестойкости и влияния на каскадное развитие пожара

С точки зрения огнестойкости верх ПЭР в условиях пожара пролива ключевыми являются:

- температура, при которой материал начинает интенсивно разрушаться ($T_{нач}$, T_{10});
- температура и длительность нахождения в диапазоне максимальной скорости разложения (около T_{50});
- наличие/отсутствие защитного остатка, способного экранировать тепловой поток.

Наноуглеродная модификация полимерного композиционного материала:

1. Увеличивает температурный запас устойчивости до начала интенсивного разложения (смещение $T_{нач}$, и T_{10} вверх).

2. Сдвигает основную массу термических разрушений в область более высоких температур, что увеличивает время до критического состояния оболочки при заданном тепловом потоке.

3. Не формирует полноценного угольного теплоизоляционного слоя, поэтому огнестойкость не переходит в класс «огнезащитных покрытий» в строгом смысле, но повышает устойчивость материала в докритической области температур [12–14].

В контексте каскадного развития пожара это означает:

- вероятность «быстрого» разрушения ПЭР и перехода к сценарию тотального пролива топлива при сравнительно умеренных тепловых нагрузках (300–400 °С на поверхности) понижается;
- при разработке теплотехнических и вероятностных моделей каскадного пожара увеличение температурных порогов

разрушения приводит к снижению интенсивностей переходов в состояние отказа и, соответственно, к уменьшению вероятности последовательного выхода из строя соседних резервуаров;

– модифицированный материал следует рассматривать как элемент системы мер, направленных на снижение каскадного риска (наряду с увеличением противопожарных разрывов, охлаждением, экранированием и др.), но не как единственное средство огнезащиты.

Заключение

1. Проведено термогравиметрическое исследование полимерного композиционного материала на основе клеевой системы TIP TOP SOLUTION MTR, модифицированного 10 мас.% астралена, в воздушной атмосфере до 1100 °С. Выделены три стадии термического разложения с суммарной потерей массы порядка 97,8 % и остатком около 2,24 %.

2. Показано, что начало интенсивного разложения и температурный интервал основной стадии термодеструкции модифицированного полимерного материала смещаются в область более высоких температур (примерно на 30–80 °С) по сравнению с типичными

значениями для термопластичных полиуретанов. Это свидетельствует о повышенной термостабильности композиции в рабочем диапазоне температур пожара пролива и позволяет рассматривать модифицированный клеевой слой как потенциальный элемент конструктивной защиты оболочек полимерных эластичных резервуаров.

3. Несмотря на малую величину остатка при 1099 °С, повышение температурных порогов начала и основной стадии разрушения приводит к увеличению времени до отказа материала при заданных тепловых воздействиях. Это создаёт дополнительный резерв времени для проведения мероприятий по тушению и охлаждению и может способствовать уменьшению вероятности каскадного развития пожара.

4. Модифицированный полимерный материал следует рассматривать как элемент комплекса мер по снижению каскадного риска, способный дополнительно повысить огнестойкость ПЭР по сравнению с использованием только немодифицированных полимерных оболочек. Для инженерной оценки требуемого эффекта необходимы дальнейшие исследования с совмещением данных термоанализа, теплотехнического моделирования и вероятностных моделей эскалации пожара.

Список литературы

1. Нестеров С. В., Бакирова И. Н., Самуилов Я. Д. Термическая и термоокислительная деструкция полиуретанов: механизмы протекания, факторы влияния и методы повышения термической стабильности. Обзор по материалам отечественных и зарубежных публикаций // Вестник Казанского технологического университета. 2011. Т. 14. С. 10–23.

2. Термический анализ при исследовании объектов судебной пожарно-технической экспертизы / М. Ю. Принцева, И. Д. Чешко, Ю. Н. Бельшина [и др.]. СПб: СПбУ ГПС МЧС России, 2018. 112 с.

3. Павлович А. В., Дринберг А. С., Машляковский Л. Н. Огнезащитные вспучивающиеся лакокрасочные покрытия. М.: ООО «Издательство «ЛКМ-пресс»», 2018. 488 с.

4. Chrissafis K., Bikiaris D. N. Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part I: An overview on thermal decomposition of addition polymers. *Thermochimica Acta*, 2011, vol. 523, issue 1–2, pp. 1–24.

5. Bikiaris D., Chrissafis K. Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part II: An overview on thermal decomposition of polycondensation polymers. *Thermochimica Acta*, 2011, vol. 523, issue 1–2, pp. 25–45.

6. Dorigato A., Rigotti D., Pegoretti A. Thermoplastic polyurethane blends with thermal energy

storage/release capability. *Frontiers in Materials*, 2018, vol. 5, article 58.

7. Functionalized graphene from electrochemical exfoliation for thermoplastic polyurethane: Thermal stability, mechanical properties, and flame retardancy / Cai W., Feng X., Hu W. [et al.]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, vol. 55, issue 43, pp. 10681–10689.

8. Nanocarbon-based flame retardant polymer nanocomposites / Yang Y., Díaz Palencia J. L., Wang N. [et al.]. *Molecules*, 2021, vol. 26, issue 15, article 4670.

9. Пономарев А. Н. Современные подходы к модификации полимерных материалов наноглеродными структурами // Российские нанотехнологии. 2012. Т. 7. № 5–6. С. 256–271.

10. Юдович В. М. Физико-химические свойства и структурные особенности композитных материалов, модифицированных астраленами: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.04. СПб: СПбГУ, 2011. 24 с.

11. Патент 2196731 Российская Федерация С2. Полиэдральные многослойные углеродные наноструктуры фуллероидного типа / А. Н. Пономарев, В. А. Никитин; опубл. 20.01.2003. Бюл. № 2. 17 с.

12. Самигуллин Г. Х., Захаров А. Е. Снижение пожарной опасности при использовании полимерных эластичных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Проблемы

управления рисками в техносфере. 2023. № 1 (65). С. 8–16.

13. Патент на полезную модель 228912 Российская Федерация U1 МПК В 65 D 88/16 Эластичный резервуар для хранения нефтепродуктов, выполненный из модифицированного полимерного материала / Г. Х. Самигуллин, А. Е. Захаров, В. О. Булатов [и др.]; опубл. 16.09.2024. Бюл. № 26.

14. Самигуллин Г. Х., Захаров А. Е., Гончаров Г. И. Повышение термостойкости внешнего слоя полимерных эластичных резервуаров путем нанесения модифицированных наноглеродных компонентов // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXVI Международной научно-практической конференции, посвящённой 375-й годовщине образования пожарной охраны России. М.: ВНИИПО МЧС России, 2024. С. 511–516.

References

1. Nesterov S. V., Bakirova I. N., Samuilov Ya. D. Termicheskaya i termookislitel'naya destruktziya poliuretanov: mekhanizmy protekaniya, faktory vliyaniya i metody povysheniya termicheskoy stabil'nosti. Obzor po materialam otechestvennykh i zarubezhnykh publikatsiy [Thermal and thermo-oxidative degradation of polyurethanes: mechanisms, influencing factors and methods for improving thermal stability. A review of domestic and foreign publications]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2011, 14:10–23.

2. Termicheskiiy analiz pri issledovanii ob'ektov sudebnoy pozharo-tekhnicheskoy ekspertizy [Thermal analysis in the investigation of objects of forensic fire-technical examination] / M. Yu. Printseva, I. D. Cheshko, Yu. N. Bel'shina [et al.]. SPb.: Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2018. 112 p.

3. Pavlovich A. V., Drinberg A. S., Mashlyakovskiy L. N. Ognezashchitnye vspuchivayushchiesya lakokrasochnye pokrytiya [Intumescent fire-protective paint coatings]. Moscow: LKM-Press; 2018. 488 p.

4. Chrissafis K., Bikiaris D. N. Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part I: An overview on thermal decomposition of addition polymers. Thermochimica Acta, 2011, vol. 523, issue 1–2, pp. 1–24.

5. Bikiaris D., Chrissafis K. Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part II: An overview on thermal decomposition of polycondensation polymers. Thermochimica Acta, 2011, vol. 523, issue 1–2, pp. 25–45.

6. Dorigato A., Rigotti D., Pegoretti A. Thermoplastic polyurethane blends with thermal energy storage/release capability. Frontiers in Materials, 2018, vol. 5, article 58.

7. Functionalized graphene from electrochemical exfoliation for thermoplastic polyurethane: Thermal stability, mechanical properties, and flame retardancy / Cai W., Feng X., Hu W. [et al.]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, vol. 55, issue 43, pp. 10681–10689.

8. Nanocarbon-based flame retardant polymer nanocomposites / Yang Y., Díaz Palencia J. L., Wang N. [et al.]. Molecules, 2021, vol. 26, issue 15, article 4670.

9. Ponomarev A. N. Sovremennye podkhody k modifikatsii polimernykh materialov nanouglerodnymi strukturami [Modern approaches to the modification of polymer materials by nanocarbon structures]. Rossiyskie nanotekhnologii, 2012, vol. 7(5–6), pp. 256–271.

10. Yudovich V. M. Fiziko-khimicheskie svoystva i strukturnye osobennosti kompozitnykh materialov, modifitsirovannykh astralenyami. Avtoreferat diss. kand. khim. nauk [Physicochemical properties and structural features of composite materials modified with astralens. Abstract of Cand. Chem. Sci.]. SPb.: Saint Petersburg State University; 2011. 24 p.

11. Ponomarev A. N., Nikitin V. A. Poliedral'nye mnogosloynnye uglerodnye nanostруктуры fulleroidnogo tipa [Polyhedral multilayer carbon nanostructures of fullerene type]. Patent RF 2196731 C2. Bulletin No. 2. 17 p.

12. Samigullin G. Kh., Zakharov A. E. Snizhenie pozharnoi opasnosti pri ispol'zovanii polimernykh elastichnykh rezervuarov dlya khraneniya nefi i nefteproduktov [Reducing fire hazard when using polymer flexible reservoirs for storage of oil and petroleum products]. Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere, 2023, vol. 1 (65), pp. 8–16.

13. Elastichnyi rezervuar dlya khraneniya nefteproduktov, vypolnenniy iz modifitsirovannogo polimernogo materiala [Elastic reservoir for petroleum products storage, made of modified polymer material] / G. Kh. Samigullin, A. E. Zakharov, V. O. Bulatov [et al.]. Patent na poleznuyu model' 228912 Rossiyskaya Federatsiya U1, IPC B65D 88/16. Bulletin No. 26.

14. Samigullin G. Kh., Zakharov A. E., Goncharov G. I. Povyshenie termostoykosti vneshnego sloya polimernykh elastichnykh rezervuarov putem naneseniya modifitsirovannykh nanouglerodnykh komponentov [Improving the thermal resistance of the external layer of polymer flexible reservoirs by applying modified nanocarbon components]. Aktual'nye problemy pozharnoi bezopasnosti: materialy XXXVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 375-y godovshchine obrazovaniya pozharnoy okhrany Rossii. Moscow: VNIPO EMERCOM of Russia, 2024. Pp. 511–516.

Захаров Александр Евгеньевич

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»

Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

старший преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств

E-mail: frzakhsach@mail.ru

Zakharov Aleksandr Evgenievich

FSBEI HE «Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia»

Russian Federation, Saint Petersburg

Senior Lecturer, Department of Fire Safety of Technological Processes and Productions

E-mail: frzakhsach@mail.ru