

Оценка пожарной опасности эластичных резервуаров на основе термогравиметрического анализа

Евгений Викторович Ширяев¹✉, Сергей Александрович Шабунин²,
Сергей Александрович Швырков¹

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

² Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Иваново, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Ежегодно появляются новые виды полимерных композитных материалов, которые применяются для изготовления быстровозводимых мягких резервуаров. Данные материалы испытывают на механическую и химическую стойкость, при этом изучению их пожароопасных свойств уделяется значительно меньше внимания. Ввиду того что композитные материалы для эластичных резервуаров являются горючими, экспериментальное исследование процесса их термодеструкции, в частности методом термического анализа, является актуальной задачей.

Цель и задачи. Целью исследования являлась оценка пожарной опасности эластичных резервуаров на основе термогравиметрического анализа трех образцов композитных материалов, которые нашли широкое применение при изготовлении эластичных резервуаров для хранения пожароопасных жидкостей. В работе проведен анализ результатов синхронного термического анализа схожих по своей структуре композитных материалов, а также температур поверхностного слоя при горении нефти и нефтепродуктов; определены интервалы термической деструкции, скорости потери массы, тепловые эффекты термоокислительной деструкции в азотно-кислородной среде исследуемых материалов.

Материалы и методы. Для оценки термостойкости полимерных композитных материалов, применяемых при изготовлении мягких резервуаров хранения пожароопасных жидкостей, были изучены физико-механические свойства следующих марок материалов: Yan Yang YY1600; Jinlong JL1600; L3690 NESU. Методом синхронного термического анализа (ТГА+ДСК) с использованием прибора Setsys Evolution 16 исследована термическая деструкция данных материалов в азотно-кислородной атмосфере.

Результаты исследования. Проведенные эксперименты позволили установить, что термодеструкция исследуемых материалов наступает при температурах 280–290 °С, что близко к температуре поверхностного слоя при горении темных нефтепродуктов. Максимальная скорость деструкции у всех образцов наблюдалась при 410–420 °С, а максимальный коксовый остаток не превышал 4,5 %. Время полного разрушения исследуемых материалов при максимальной скорости убыли массы составило от 9 до 14 мин в зависимости от вида образца.

Выводы. Температура начала термодеструкции трех исследуемых марок полимерных композитных материалов близка к температуре поверхностного слоя при горении высококипящих жидкостей, что создает опасность разгерметизации при воспламенении пролива темных нефтепродуктов на поверхности исследуемых материалов.

Ключевые слова: эластичный композитный материал; пожарная опасность; нефть; нефтепродукт; экспериментальная установка; термодеструкция

Для цитирования: Ширяев Е.В., Шабунин С.А., Швырков С.А. Оценка пожарной опасности эластичных резервуаров на основе термогравиметрического анализа материала // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 37–46. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.37-46

✉ Ширяев Евгений Викторович, e-mail: shiryaevev@bk.ru

Fire hazard assessment of elastic tanks based on thermogravimetric analysis

Evgeniy V. Shiryayev¹✉, Sergey A. Shabunin², Sergey A. Shvyrkov¹

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

² Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Ivanovo, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Every year, new types of polymer composite materials appear, which are used for the manufacture of quickly erected soft tanks. These materials are tested for mechanical and chemical resistance, while much less attention is paid to the study of their fire-hazardous properties. Due to the fact that composite materials for elastic tanks are combustible, the experimental study of the process of their thermal destruction process, in particular by the method of thermal analysis, is an urgent task.

Purpose and objectives. The aim of the study was to assess the fire hazard of elastic tanks based on thermogravimetric analysis of three specimens of composite materials, which are widely used in the manufacture of elastic tanks for the storage of flammable liquids. The paper analyzes the results of synchronous thermal analysis of composite materials similar in structure, as well as surface layer temperatures during burning of oil and petroleum products; the intervals of thermal destruction, mass loss rates, and thermal effects of thermo-oxidative destruction in the nitrogen-oxygen environment of the studied materials are determined.

Materials and methods. To assess the thermal resistance of polymer composite materials used in the manufacture of soft storage tanks for flammable liquids, the physical and mechanical properties of the following material grades were studied: Yan Yang YY1600; Jinlong JL1600; L3690 NESU. Thermal destruction of these materials in nitrogen-oxygen atmosphere was studied by the method of synchronous thermal analysis (TGA+DSC) using Setsys Evolution 16 device.

Results of the study. The experiments carried out made it possible to establish that thermal destruction of the materials under study occurs at temperatures of 280–290 °C, which is close to the temperature of the surface layer during combustion of dark petroleum products. The maximum rate of destruction in all specimens was observed at 410–420 °C, and the maximum coke residue did not exceed 4.5 %. The time of complete destruction of the studied materials at the maximum rate of mass loss ranged from 9 to 14 minutes, depending on the type of specimen.

Conclusions. The temperature of the beginning of thermal destruction of the three grades of polymer composite materials under study is close to the temperature of the surface layer during the combustion of high-boiling liquids, which creates danger of depressurization during ignition of a spill of dark petroleum products on the surface of the materials under study.

Keywords: elastic composite material; fire hazard; oil; petroleum product; experimental installation; thermal destruction

For citation: Shiryayev E.V., Shabunin S.A., Shvyrkov S.A. Fire hazard assessment of elastic tanks based on thermogravimetric analysis. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):37-46. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.37-46 (rus).

✉ Evgeniy Viktorovich Shiryayev, e-mail: shiryayev@bk.ru

Введение

Эластичные (мягкие, резиноканевые) резервуары для хранения различных видов горючих жидкостей, в том числе нефти и нефтепродуктов, нашли широкое применение в различных отраслях промышленности как в России, так и за рубежом [1, 2]. Небольшие быстровозводимые склады для хранения горючих жидкостей необходимы в первую очередь в местах освоения новых месторождений полезных ископаемых на труднодоступных территориях, где требуется работа тяжелой техники, например в арктической зоне и удаленных от развитой инфраструктуры территорий [3]. Резиноканевые резервуары также широко применяются для сбора и временного хранения нефти и нефтепродуктов при ликвидации аварийных разливов как в водной акватории, так и на грунте [4].

Современный рынок полимерных композитных материалов, которые возможно использовать для хранения нефти и нефтепродуктов, достаточно большой. Наиболее крупными отечественными производителями мягких резервуаров являются НПФ «Политехника» (politechnika.ru) и группа компаний «Нефтетанк» (neftetank.ru). Международные компании, например Markleen (markleen.com)

и OPECsystems (opceansystems.com), специализируются на производстве эластичных резервуаров, боновых заграждений и комплектующих для локализации и ликвидации крупномасштабных аварийных разливов нефти в океане и прибрежной территории.

С появлением и применением новых видов полимерных композиционных материалов современные эластичные резервуары обладают высокой морозостойкостью (до минус 70 °C) и имеют относительно небольшой вес, что позволяет их без особых затруднений транспортировать и использовать в различных климатических условиях (рис. 1, 2).

Основным преимуществом эластичных резервуаров является быстрота их сборки и демонтажа, а недостатком, с точки зрения пожарной безопасности, горючесть композиционных материалов. В работах [5–8] приведены методики исследования и результаты испытаний с определением физико-механических свойств эластичных композитных резиноканевых резервуаров. Однако исследованию пожароопасных свойств материалов, из которых эти резервуары изготавливаются, уделено значительно меньше внимания, что и указывает на актуальность рассматриваемой тематики, с учетом того, что резервуары часто применяются для хранения



Рис. 1. Склад нефтепродуктов в арктической зоне
Fig. 1. Petroleum products warehouse in the Arctic zone

горючих жидкостей [9]. Для оценки угрозы развития пожара при воспламенении локальных проливов нефти и нефтепродуктов на поверхности эластичных резервуаров необходимо: провести анализ результатов синхронного термического анализа схожих по своей структуре композитных материалов, температуры поверхностного слоя при горении нефти и нефтепродуктов; определить интервалы термической деструкции, скорости потери массы, тепловые эффекты термоокислительной деструкции в азотно-кислородной среде исследуемых материалов.

Предпосылки проведения экспериментальных исследований

Повышение термостойкости и прочности на растяжение эластичных армированных полимеров достигается за счет применения различных наполнителей: модифицированных кремнеземов, цеолитов, полиэфирных олигомерных силесквиоксанов (POSS), нанотрубок и др. [10–14].

Для оценки пожарной опасности при размещении складов горючих жидкостей в резервуарах из полимерных композитов необходимо знать параметры термодеструкции этих материалов. Одним из наиболее точных методов оценки параметров разрушения материала под действием температуры является термогравиметрический анализ TGA [15–18]. Одной из важных величин, которая позволяет оценить пожарную опасность материала, является температура начала термодеструкции, поскольку деструкция материала будет сопровождаться выделением горючих продуктов, способных при определенных условиях воспламениться и поддерживать горение. Другим параметром, получаемым по результатам термогравиметрического анализа, является скорость убыли массы (часто обозначается как «dTg»), на графической зависимости которой характерно наличие точек экстремума, где наблюдается максимальная



Рис. 2. Эластичный резервуар близ Каспия
Fig. 2. Elastic reservoir near the Caspian Sea

скорость потери массы образцом. Соответственно, чем раньше будет начинаться термодеструкция материала, тем раньше создадутся условия, необходимые для его горения, и тем быстрее будут ухудшаться физико-механические свойства данного материала, что может привести к нарушению его целостности и разрушению.

Изменение физических свойств исследуемых материалов при повышении температуры воздействия на них позволяет не только охарактеризовать процесс термоокислительной деструкции материала, но и определить их зависимость от температуры воздействия, что важно для оценки степени термического воздействия на исследуемый материал [19].

В работе [14] приведены результаты выполненного синхронного термического анализа, основанного на термогравиметрическом и дифференциально-термогравиметрическом методах, который показал, что термоокислительная деструкция испытуемых эластичных материалов марок Rema TIP-TOP Solution MTR начинается при температуре около 340 °С, при этом материал, модифицированный астраленом (10 % масс.), сохранил 25–30 % исходной массы.

Известно, что температура пламени при горении нефти и нефтепродуктов превышает 1000 °С, а температура поверхностного слоя жидкости близка к температуре ее кипения и определяются в зависимости от разгонки топлива [20]. Так, например, при горении бензина температура его поверхностного слоя находится в диапазоне от 90 до 110 °С, керосина — от 170 до 220 °С, дизельного топлива — от 230 до 240 °С, солярового масла — от 280 до 340 °С, нефти — от 130 до 350 °С, мазута — от 350 до 430 °С [21–23]. Таким образом, для оценки возможности воспламенения эластичных композитных резиноканевых резервуаров при проливе пожароопасной жидкости (нефти, нефтепродуктов) важно знать параметры термической деструкции материала.

Исходные данные, экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Исследование параметров термической деструкции проводилось на трех образцах полимерных композиционных материалов, марки которых наиболее часто используются в конструкциях эластичных резервуаров: Yan Yang YY1600¹; Jinlong JL1600²; L3690 NESU³ (производство — Китай). Резервуары на основе представленных материалов нашли применение для хранения нефти и нефтепродуктов в России, Китае, Новой Зеландии и Австралии. В табл. 1 представлены общий вид и свойства исследуемых образцов.

Термодеструкция образцов изучалась на термическом анализаторе марки Setsys Evolution 16 (Setaram, Франция) с использованием ДСК-датчика S-типа Pt/PtRh (10 %) общий вид которого показан на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид термического анализатора марки Setsys Evolution 16

Fig. 3. General view of the Setsys Evolution 16 thermal analyzer

Таблица 1. Общий вид и свойства образцов материалов

Table 1. General appearance and properties of material specimens

Параметр Parameter	Виды исследуемых образцов композитных материалов Types of studied specimens of composite materials		
Название материала Name of the material	YAN YANG YY1600	JINLONG JL1600	L3690 NESU
Фото поперечного сечения материала Photo of the cross section of the material			
Фото наружной поверхности Photo of the outer surface			
Плотность материала, г/м ² Material density, g/m ²	1600	1178	1224
Температурная область применения, °C Temperature range of application, °C	От минус 50 до 120 From minus 50 to 120	От минус 50 до 130 From minus 50 to 130	От минус 40 до 82 From minus 40 to 82
Толщина материала, мм Material thickness, mm	1,35	1,02	1,10

¹ Yan Yang YY1600 : технический сертификат. URL: https://www.politechnika.ru/catalog/k-11494606-myagkiye_rezervuary (дата обращения: 17.03.2024).

² Jinlong JL1600 : технический сертификат. URL: https://www.politechnika.ru/catalog/k-11494606-myagkiye_rezervuary (дата обращения: 17.03.2024).

³ L3690 NESU : технический сертификат. URL: https://www.politechnika.ru/catalog/k-11494606-myagkiye_rezervuary (дата обращения: 17.03.2024).

Скорость нагрева образца составляла 10 °С/мин. Газовая среда создавалась смешением азота⁴ и кислорода⁵.

Расход газа составлял 50 мкл/мин. Навеску образца массой ≈ 12 мг помещали в тигель из оксида алюминия. Диапазон температурных измерений составлял от 50 до 1000 °С.

Результаты экспериментов и их обсуждение

По результатам выполненных экспериментов в азотно-кислородной (21 %) среде получены ТГ- и ДСК-кривые исследуемых образцов материалов, общий вид которых представлен на рис. 4–6.

При анализе полученных данных видно, что для всех рассматриваемых образцов эластичных

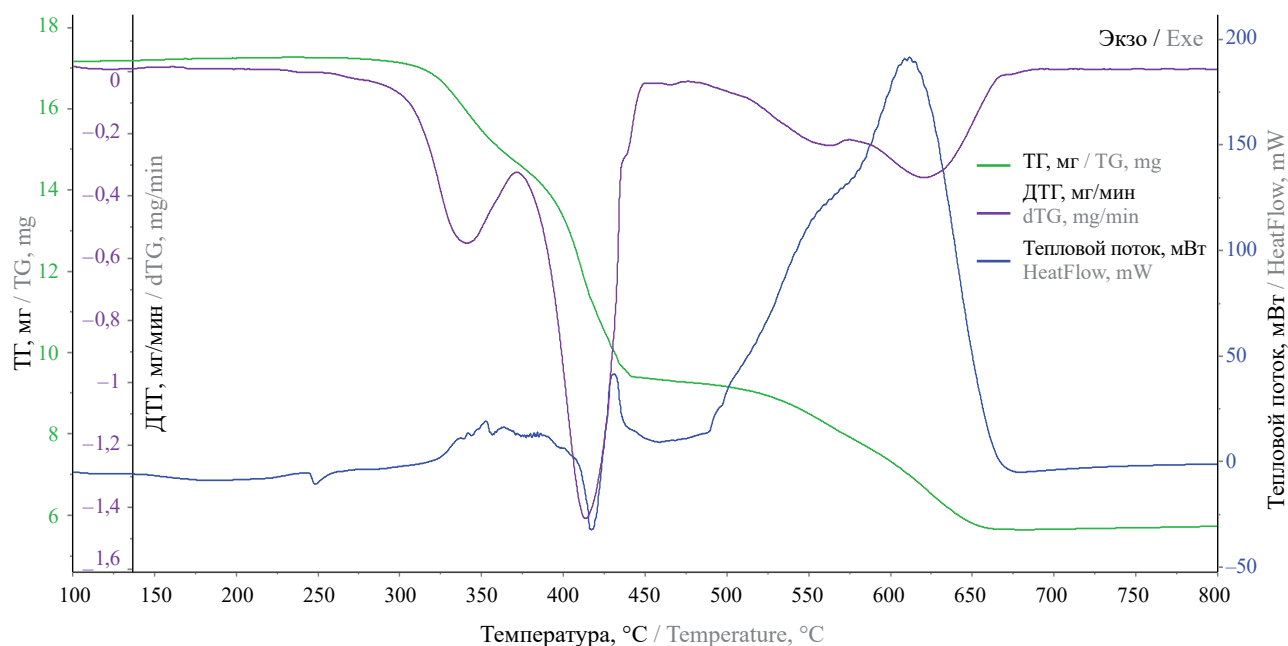


Рис. 4. График зависимости потери массы образца материала марки Yan Yang YY1600 от температурного нагрева
Fig. 4. Graph of dependence of mass loss of Yan Yang YY1600 material specimen on temperature heating

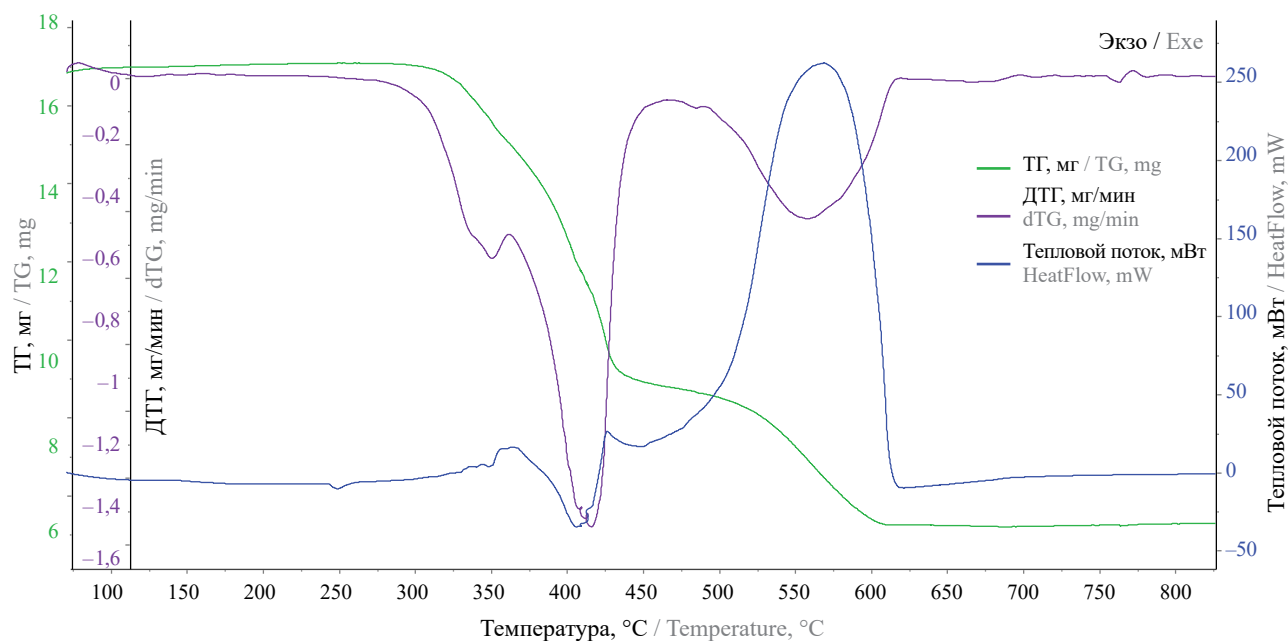


Рис. 5. График зависимости потери массы образца материала марки Jinlong JL1600 от температурного нагрева
Fig. 5. Graph of dependence of mass loss of Jinlong JL1600 material specimen on temperature heating

⁴ ОСЧ ГОСТ 9293–74 ИСО 2435–73. Азот газообразный и жидкий. Технические условия.

⁵ ГОСТ 5583–78. Кислород газообразный технический и медицинский. Технические условия.

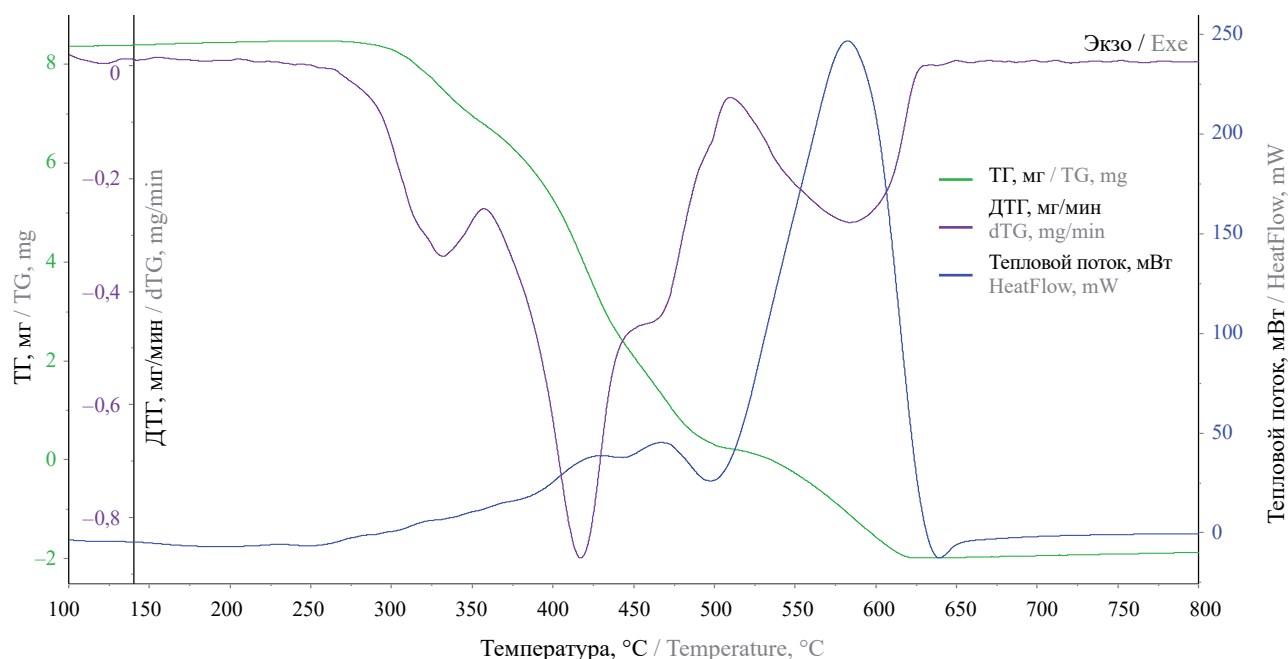


Рис. 6. График зависимости потери массы образца материала марки L3690 NESU от температурного нагрева
Fig. 6. Graph of dependence of mass loss of L3690 NESU material specimen on temperature heating

композитных материалов процесс термоокислительной деструкции имеет схожий характер, при этом время начала термодеструкции практически совпадает (± 5 с). На каждой термогравиметрической кривой отчетливо прослеживаются три участка, причем диапазон первого из них для всех образцов также практически совпадает. Окончание термодеструкции происходит в диапазоне температур от 600 до 700 °C, при этом для образцов из материалов марок Jinlong JL1600 и L3690 NESU температура примерно одинакова, а для YY1600 составляет 670 °C. Термоокислительная деструкция имеет экзотермический характер (табл. 2).

Максимальная скорость деструкции у всех образцов наблюдалась при 410–420 °C, а максимальный коксовый остаток не превышал 4,5 %.

В табл. 3 представлены положения максимумов на кривой dTg, которая отражает скорость потери массы. Положения первого и второго максимумов у всех исследованных материалов практически совпадают. Характерно, что максимальная скорость деструкции наблюдается для всех материалов в области от 410 до 420 °C. На температурный интервал 360–470 °C приходится наибольшая потеря массы для каждого образца, и, как следствие, убыль массы достигает 65–70 % к 500 °C.

Характеристики пиков на кривой ДСК (тепловой поток) (см. рис. 4–6) представлены в табл. 4. Экзотермический характер термодеструкции проявляется в следующих интервалах температур: для JL1600 444–623 °C, YY1600 — 425–680 °C, в то время как для L3690 NESU — в интервале температур 258–640 °C. В кривых ДСК (тепловой поток) YY1600

Таблица 2. Интервалы термической деструкции исследуемых материалов
Table 2. Intervals of thermal destruction of the studied materials

Порядок пиковых значений The order of the peak values	Виды исследуемых образцов композитных материалов Types of studied specimens of composite materials		
	Yan Yang YY1600	Jinlong JL1600	L3690 NESU
1 интервал, °C / % потери массы 1 interval, °C / % mass loss	280–363/19,4	290–362/16,9	280–357/15,2
2 интервал °C / % потери массы 2 interval, °C / % mass loss	363–468/46,3	362–467/51,0	358–508/60,1
3 интервал °C / % потери массы 3 interval, °C / % mass loss	468–670/31,1	468–610/29,0	508–622/20,2
Общий интервал термической деструкции, °C The total interval of thermal destruction, °C	290–670	290–610	280–622
Коксовый остаток, % Coke residue, %	3,2	3,1	4,5

Таблица 3. Положение максимумов на кривых dTg
Table 3. Position of maxima on dTg curves

Порядок пиковых значений The order of the peak values	Виды исследуемых образцов композитных материалов Types of studied specimens of composite materials		
	Yan Yang YY1600	Jinlong JL1600	L3690 NESU
1 максимум 1 maximum	341 °C/–0,55 мг/мин 341 °C/–0.55 mg/min	350 °C/–0,54 мг/мин 350 °C/–0.54 mg/min	332 °C/–0,34 мг/мин 332 °C/–0.34 mg/min
2 максимум 2 maximum	413 °C/–1,43 мг/мин 413 °C/–1.43 mg/min	416 °C/–1,34 мг/мин 416 °C/–1.34 mg/min	418 °C/–0,87 мг/мин 418 °C/–0.87 mg/min
3 максимум 3 maximum	620 °C/–0,34 мг/мин 620 °C/–0.34 mg/min	558 °C/–0,42 мг/мин 558 °C/–0.42 mg/min	583 °C/–0,28 мг/мин 583 °C/–0.28 mg/min

Таблица 4. Характеристики пиков на кривой ДСК
Table 4. Characteristics of peaks in the DSC curve

Порядок пиковых значений The order of the peak values	Виды исследуемых образцов композитных материалов Types of studied specimens of composite materials		
	Yan Yang YY1600	Jinlong JL1600	L3690 NESU
1 интервал, °C / тепловой эффект, Дж/г 1 interval, °C / thermal effect, J/g	385–425/228	362–426/702	258–499/–1200
2 интервал, °C / тепловой эффект, Дж/г 2 interval, °C / thermal effect, J/g	425–460/–175	444–623/–10 600	499–640/–9620
3 интервал, °C / тепловой эффект, Дж/г 3 interval, °C / thermal effect, J/g	460–680/–9086	–	–

и JL1600 пик с эндотермическим тепловым эффектом находится практически на одном интервале.

На основании паспортных данных на исследуемые материалы можно оценить, что 1 мм² весит от 1,2 до 1,6 мг. Учитывая небольшую толщину (1,02–1,30 мм) и данные термогравиметрического анализа, можно утверждать, что горение нефтепродукта в непосредственной близости от резервуара приведет к быстрому разрушению его эластичной оболочки. Так, при температуре материала резервуара 340 °C с учетом значения dTg из табл. 3 разрушение его оболочки произойдет в течение всего нескольких минут.

Выводы

В результате выполненных экспериментов установлено, что термодеструкция исследуемых материалов наступает при температуре 280–290 °C, что ниже температуры поверхностного слоя при горении темных нефтепродуктов (нефть, соляровое масло, мазут). При дальнейшем повышении температуры процесс разрушения оболочки резервуара будет ускоряться за счет выделяющейся энергии в результате термоокислительной деструкции материала,

при этом максимальная скорость деструкции у всех образцов достигается при температуре 410–420 °C.

Время полного разрушения исследуемых материалов при максимальной скорости убыли массы составило от 9 до 14 мин в зависимости от вида образца: для JL1600 ~ 9 мин; для YY 1600 ~ 11 мин; для L3690 NESU ~ 14 мин. Таким образом, подтверждается возможность разгерметизации от температуры нагрева поверхностного слоя при горении пролива высококипящих жидкостей на поверхности эластичного резервуара. Дополнительные данные по времени разрушения исследуемых материалов должны быть уточнены при проведении крупномасштабных испытаний в заполненных горючей жидкостью резервуарах.

Стоит отметить, что перспективным направлением исследования пожарной опасности резервуаров из композитных эластичных материалов является экспериментальная оценка параметров термодеструкции от теплового излучения при горении пожароопасных жидкостей на поверхности резервуара и с поверхности пролива вблизи резервуара, а также влияния различных способов противопожарной защиты на снижение пожарной опасности эластичных резервуаров с горючими жидкостями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Константинов И.В., Богачева Е.Р., Краснов Е.С. Мягкие резервуары: применение и преимущества // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 46. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_47415673_72698647.pdf
2. Кургин Р.В. Мягкие резервуары. Описание и применение // Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 6 (38). С. 80–81.

3. Попов В.А., Подугалова Ю.Ю. Возможность применения мягких резервуаров для осуществления авиатопливообеспечения воздушных перевозок в арктической зоне Российской Федерации // The scientific heritage. 2021. № 81. С. 55–58. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-81-1-55-58
4. Контев Д.П. Норильский разлив: уроки и последствия // Бурение и нефть. 2020. № 7–8. С. 3–9.
5. Уэдлер Е.М. Совершенствование методики расчета мягких резервуаров с жидкостью // Известия КазГАСУ. 2011. № 2 (16). С. 110–115.
6. Алексеев С.А. Расчет мягких наземных емкостей для жидкостей // Сб. статей по исследованию прочности, устойчивости и выносливости авиационных конструкций : Труды Военно-воздушной Академии им. Жуковского. 1980. Вып. 1265. С. 208–216.
7. Shirieva N.S., Shiriev A.K., Tlyasheva R.R., Naumkin E.A. Study of mechanical properties and analysis of low temperatures influence on flexible tank engineering structural material behavior // Russian petroleum technology conference. 2020. DOI: 10.2118/202035-MS
8. Рыбаков Ю.Н., Дедов А.В., Кюннан Р.И., Ларионов С.В. Исследование проницаемости фторированного полиэтилена высокого давления для складов временного хранения топлива // Научно-технический журнал «Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов». 2021. Т. 11. № 1. С. 65–69.
9. Ruochen Yang, Faisal Khan, Eugenio Turco Neto, Riza Rusli, Jie Ji. Could pool fire alone cause a domino effect? // Reliability Engineering & System Safety. 2020. Vol. 202. DOI: 10.1016/j.ress.2020.106976
10. Paul D.R., Mark J.E. Fillers for polysiloxane (“silicone”) elastomers // Progress in Polymer Science. 2010. Vol. 35. Issue 7. Pp. 893–901.
11. Fang W.Z., Zeng X.R., Lai X.J., Li H.Q., Chen W.J., Zhang Y.J. Thermal degradation mechanism of addition-cure liquid silicone rubber with urea-containing silane // Thermochimica Acta. 2015. Vol. 605. Pp. 28–36. DOI: 10.1016/j.tca.2015.02.011
12. Prahdan B., Srivastava S.K. Synergistic effect of three dimensional multi-walled carbon nanotube/graphene nanofiller in enhancing the mechanical and thermal properties of high performance silicone rubber // Indian institute of technology. 2014. Pp. 110–115. DOI: 10.1002/pi.4627
13. Kumar D., Sharma S., Kushwaha P.K. Recent progress in experimental and molecular dynamics study of carbon nanotube reinforced rubber composites : a review // Polymer-Plastics Technology and Materials. 2022. P. 34. DOI: 10.1080/25740881.2022.2084411
14. 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.
15. Архангельский И.В., Нагановский Ю.К., Годунов И.А. и др. Термоаналитический межлабораторный эксперимент по идентификации материалов, веществ и средств огнезащиты // Пожарная безопасность. 2020. № 3 (100). С. 15–23. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.63.99.001
16. Богданов И.А., Шабунин С.А., Ульева С.Н. и др. Оценка влияния температурных воздействий на пожарную опасность изоляции на основе ПВХ-диэлектриков // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 4 (45). С. 64–70.
17. Preeti Moni Doley, Anthony Chun Yin Yuen, Imrana Kabir, Luzhe Liu, Cheng Wang, Timothy Bo Yuan Chen et al. Thermal hazard and smoke toxicity assessment of building polymers incorporating TGA and FTIR–Integrated cone calorimeter arrangement // Fire. 2022. No. 5 (5). P. 139. DOI: 10.3390/fire5050139
18. Кобелев А.А., Нагановский Ю.К., Круглов Е.Ю. и др. Пиролиз гибридной полиуретано-неорганической теплоизоляции: термогравиметрический анализ и Фурье ИК-спектры // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 5–15. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.5-15
19. Беззапонная О.В. Изучение особенностей развития пожара с использованием метода синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. № 31 (5). С. 26–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.26-32
20. Корольченко А.Я. Процессы горения и взрыва. М. : Пожнаука, 2007. 266 с.
21. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. 2-е изд., перераб. М. : Химия, 1981. 272 с.
22. Lulu Fang, Jun Fang, Yong Hu, Fengyuan Tian, Mengwen Wang, Hassan Raza Shah et al. Experimental study of coupling between the burning behaviors of fuel storage tanks and thin fuel pools // Energy. 2018. Vol. 285. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129418
23. Zhao J., Huang H., Jomaas G., Zhong M., Yang. Experimental study of the burning behaviors of thin-layer pool fires // Combustion and Flame. 2023. Vol. 193. Pp. 327–334. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129418

REFERENCES

1. Konstantinov I.V., Bogacheva E.R., Krasnov E.S. Soft reservoirs: application and advantages. *Innovations. Science. Education*. 2021; 46. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_47415673_72698647.pdf (rus).
2. Kurgin R.V. Soft reservoirs. Description and application. *Exposition Neft Gaz*. 2014; 6(38):80-81. (rus).
3. Popov V.A., Podugalova Yu.Yu. The possibility of using soft tanks for aviation fuel supply of air transportation in the Arctic zone of the Russian Federation. *The scientific heritage*. 2021; 81:55-58. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-81-1-55-58 (rus).
4. Koptev D.P. Norilsk spill: lessons and consequences. *Drilling and oil*. 2020; 7-8:3-9. (rus).
5. Wedler E.M. Improving the methodology for calculating soft tanks with liquid. *Izvestiya KazGASU*. 2011; 2(16):110-115. (rus).
6. Alekseev S.A. Calculation of soft ground containers for liquids. *Collection of articles on the study of strength, stability and endurance of aircraft structures : Proceedings of the Air Force Academy. Zhukovsky*. 1980; 1265:208-216. (rus).
7. Shirieva N.S., Shiriev A.K., Tlyasheva R.R., Naumkin E.A. Study of mechanical properties and analysis of low temperatures influence on flexible tank engineering structural material behavior. *Russian petroleum technology conference*. 2020. DOI: 10.2118/202035-MS
8. Rybakov Yu.N., Dedov A.V., Kunnap R.I., Larionov S.V. Investigation of the permeability of high-pressure fluorinated polyethylene for temporary fuel storage warehouses. *Scientific and technical journal "Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products"*. 2021; 11(1):65-69. (rus).
9. Ruochen Yang, Faisal Khan, Eugenio Turco Neto, Riza Rusli, Jie Ji. Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliability Engineering & System Safety*. 2020; 202:106976. DOI: 10.1016/j.res.2020.106976
10. Paul D.R., Mark J.E. Fillers for polysiloxane ("silicone") elastomers. *Progress in Polymer Science*. 2010; 35(7):893-901.
11. Fang W.Z., Zeng X.R., Lai X.J., Li H.Q., Chen W.J., Zhang Y.J. Thermal degradation mechanism of ad-dition-cure liquid silicone rubber with urea-contain-ing silane. *Thermochimica Acta*. 2015; 605:28-36. DOI: 10.1016/j.tca.2015.02.011
12. Prahdan B., Srivastava S.K. Synergistic effect of three dimensional multi-walled carbon nanotube/graphene nanofiller in enhancing the mechanical and thermal properties of high performance silicone rubber. *Indian institute of technology*. 2014; 110-115. DOI: 10.1002/pi.4627
13. Kumar D., Sharma S., Kushwaha P.K. Recent progress in experimental and molecular dynamics study of carbon nanotube reinforced rubber composites : a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2022; 34. DOI: 10.1080/25740881.2022.2084411
14. Samigullin G.H., Zakharov A.E. Reducing fire danger when using polymer elastic tanks for storing oil and petroleum products. *Problems of risk management in the technosphere*. 2023; 1(65):8-16. (rus).
15. Arkhangelsky I.V., Naganovsky Yu.K., Godunov I.A. et al. Thermoanalytical interlaboratory experiment on the identification of materials, substances and means of fire protection. *Fire safety*. 2020; 3(100):15-23. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.63.99.001(rus).
16. Bogdanov I.A., Shabunin S.A., Uleva S.N. et al. Assessment of the influence of temperature influences on the fire hazard of insulation based on PVC dielectrics. *Modern problems of civil protection*. 2022; 4(45):64-70. (rus).
17. Preety Moni Doley, Anthony Chun Yin Yuen, Imrana Kabir, Luzhe Liu, Cheng Wang, Timothy Bo Yuan Chen et al. Thermal hazard and smoke toxicity assessment of building polymers incorporating TGA and FTIR–Integrated cone calorimeter arrangement. *Fire*. 2022; 5(5):139. DOI: 10.3390/fire5050139
18. Kobelev A.A., Naganovsky Yu.K., Kruglov E.Yu. et al. Pyrolysis of hybrid polyurethane-inorganic thermal insulation: thermogravimetric analysis and Fourier IR spectra. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and explosion safety*. 2022; 31(4):5-15. (rus).
19. Bezzaponnaya O.V. Studying the features of fire development using the method of synchronous thermal analysis. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):26-32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05. 26-32 (rus).
20. Korolchenko A.Ya. *Gorenje i explosion processes*. Moscow, Pozhnauka, 2007; 266. (rus).
21. Demidov P.G., Shandyba V.A., Shcheglov P.P. *Burning and properties of combustible substances*. 2nd ed., reprint. Moscow, Khimiya, 1981; 272. (rus).
22. Lulu Fang, Jun Fang, Yong Hu, Fengyuan Tian, Mengwen Wang, Hassan Raza Shah et al. Experimental study of coupling between the burning behaviors of fuel storage tanks and thin fuel pools. *Energy*. 2018; 285. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129418
23. Zhao J., Huang H., Jomaas G., Zhong M., Yang. Experimental study of the burning behaviors of thin-layer pool fires. *Combustion and Flame*. 2023; 193:327-334. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129418

Поступила 19.03.2024, после доработки 09.04.2024;

принята к публикации 19.04.2024

Received March 19, 2024; Received in revised form April 9, 2024;

Accepted April 19, 2024

Информация об авторах

ШИРЯЕВ Евгений Викторович, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 759806; ORCID: 0000-0002-5845-7308; e-mail: shiryaev@bk.ru

ШАБУНИН Сергей Александрович, научный сотрудник Научно-исследовательского отделения учебно-научного комплекса «Государственный надзор», Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 153040, г. Иваново, пр-кт Строителей, 33; РИНЦ ID: 740493; ORCID: 0009-0000-5712-1768; e-mail: sergeyshabunin@yandex.ru

ШВЫРКОВ Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 479363; ORCID: 0000-0001-7449-8794; e-mail: pbtp@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Evgeniy V. SHIRYAEV, Associate Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety Protection Facilities, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 759806; ORCID: 0000-0002-5845-7308; e-mail: shiryaev@bk.ru

Sergey A. SHABUNIN, Researcher at the Research Department of the Educational and Scientific Complex “State Supervision”, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Stroiteley Avenue, 33, Ivanovo, 153040, Russian Federation; ID RISC: 740493; ORCID: 0009-0000-5712-1768; e-mail: sergeyshabunin@yandex.ru

Sergey A. SHVYRKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety Protection Facilities, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 479363; ORCID: 0000-0001-7449-8794; e-mail: pbtp@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.