

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-3>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/96TVN316.pdf>

Статья опубликована 08.06.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Мельников В.С., Кириллов С.В., Мельников М.В., Васильев В.Г., Ванин С.А., Потемкин С.А. Пожарно-структурная экспертиза поврежденных теплоизоляционных материалов из минеральной ваты и пенополиизоцианурата // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/96TVN316.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 614.841.41

Мельников Владимир Семенович

ООО «Международный противопожарный центр», Россия, Москва¹
Заместитель Генерального директора
Старший научный сотрудник
Кандидат технических наук
E-mail: melnikov@firecenter.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=854938

Кириллов Сергей Владимирович

ООО «Международный противопожарный центр», Россия, Москва
Ведущий специалист
E-mail: sv@firecenter.ru

Мельников Михаил Владимирович

ООО «Международный противопожарный центр», Россия, Москва
Логистик
E-mail: log54@mail.ru

Васильев Виктор Григорьевич

ЗАО «Ариада», Россия, Волжск
Генеральный директор
Доктор экономических наук
E-mail: ariada@mari-el.ru

Ванин Сергей Александрович

ЗАО «ТД «Ариада», Россия, Москва
Генеральный директор
E-mail: td-ariada@yandex.ru

Потемкин Сергей Александрович

ООО «Международный противопожарный центр», Россия, Москва
Ведущий специалист
E-mail: potemkin@firecenter.ru

**Пожарно-структурная экспертиза повреждений
теплоизоляционных материалов из минеральной ваты и
пенополиизоцианурата**

¹ 115446, Москва, Коломенский проезд, д. 14

Аннотация. Установлена возможность структурной идентификации повреждённых при пожаре теплоизоляционных материалов из минеральной ваты и пенополиизоцианурата в практически значимом диапазоне длительности и интенсивности огневого и теплового воздействия. Выполнен анализ влияния теплотехнических и пожарно-технических характеристик, поверхностных эффектов и масштабного фактора. Авторами введена классификация повреждений: два типа для материалов с неорганической основой и десять типов для пенополимеров. Показано, что структура повреждений по признакам изменения объёма, формы пор и состояния поверхности сохраняет преемственность на разных стадиях развития пожара, в соответствии с признаками каждого типа по длине и толщине теплоизоляционных материалов развиваются возникающие на начальной стадии спекания, трещины, обугливания, раковины или щели, изменения объёма, цвета и электропроводности. Приведены примеры улучшения пожарно-технических характеристик за счёт конструктивно-технологических решений с направленным отбором механизмов повреждений. Формат публикации в интернете позволил представить авторские фотоматериалы большого числа исследований лабораторного, стендового и натурального масштаба, в которых выявлена пожарная опасность теплоизоляционных материалов, в том числе, на основе минеральной ваты. Стандартные методы испытаний дополнены тепловыми тестами и тестами на электропроводность, усиливающими контроль качества продукции, а также повышающими достоверность экспертизы пожаров.

Ключевые слова: пенополиизоцианурат; минеральная вата; горючесть; воспламеняемость; пожарная опасность; огнестойкость конструкций; сэндвич -панели; теплоизоляционные материалы; структура повреждений; классификация повреждений; экспертиза пожаров; тепловой эффект; теплопроводность; теплопрозрачность; тепловой тест; тест на электропроводность

1. Введение

Как известно, повреждённые при огневом и тепловом воздействии объекты сохраняют полезные сведения о причинах и развитии пожаров.

Стандарты на испытания ^{2, 3} также предусматривают фиксацию информации о структуре повреждений: изменении цвета, оплавлении, спекании, усадке, вспучивании, короблении, образовании трещин и т.п. Указанные повреждения регистрируют визуально или с помощью фото- видеосъёмки.

Благодаря такому документированию накоплен значительный объём информации, в частности, о повреждениях теплоизоляционных материалов ⁴ из модификаций пенополиизоцианурата (сокращённо ПИР) и на основе минеральной ваты (МВ), которые применяются в фасадных и кровельных системах, в покрытиях и стенах из сэндвич-панелей.

Сложность оценок в данной области знаний связана с разнообразием продукции, выпускаемой под едиными наименованиями, хотя по теплотехническим и пожарно-техническим характеристикам существенно различаются не только ПИР и МВ материалы, но

² ГОСТ 30244-94. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть. Введ. 1995-01-01. М. ФГУП Стандартиформ. 2008. 16 с.

³ ГОСТ 30403-2012. Конструкции строительные. Метод испытания на пожарную опасность. Введ. 2012-12-27. М. ФГУП Стандартиформ. 2014. 10 с.

⁴ Термины и определения по п. 2.1.1, 2.1.2.9, 2.1.16 ГОСТ 31913-2011(EN ISO 9229-2007). Материалы и изделия теплоизоляционные. Термины и определения. Введ. 2013-07-01. М. ФГУП Стандартиформ. 2013. 13 с.

и одноимённые теплоизоляционные материалы, причём, даже в рамках производственных программ каждого отдельного поставщика.

В связи с этим актуальна дополнительная классификация, которая позволит идентифицировать материалы и устанавливать, как их положительные, так и отрицательные свойства.

Соответственно целью настоящей работы было обобщение данных о повреждениях ПИР и МВ материалов для объективного расследования пожаров, совершенствования методов испытаний и экспертизы, контроля качества продукции, разработки новых сырьевых композиций.

Одновременно с основной темой в настоящей работе представлены выборочные обзоры сведений (о продукции, стандартных и дополнительных методах испытаний), необходимые для понимания причин и хода наблюдаемых процессов.

2. Сравнение характеристик теплоизоляционных материалов

Последствия огневого и теплового воздействия на теплоизоляционные материалы наиболее глубоко исследованы в области химических процессов деструкции [1, 2] и термогравиметрии [3, 4]. Для большинства материалов известно, какие реакции соответствуют определенным условиям, в каком количестве и какие вещества могут выделяться. Сразу отметим, что при пожаре аналогичные и часто даже более опасные продукты образуются из-за функциональной пожарной нагрузки, причём масса размещённых в зданиях веществ, материалов, мебели, изделий, товаров и т.д. обычно существенно превышает массу теплоизоляционных материалов. По мнению авторов, при реальном соотношении пожарных нагрузок (функциональных и конструктивных) во время пожара эмиссия опасных (токсичных) веществ теплоизоляционными материалами не доминирует в ряду опасных факторов. С учётом этого в рамках настоящей работы учитывались в основном те характеристики исходных материалов, те свойства промежуточных продуктов реакций, а также фазовые переходы, которые способствовали процессу горения или ограничивали его развитие.

Выборка данных (табл. 1) позволяет в обзоре темы обратить внимание на следующие известные факты касательно свойств материалов и методов испытаний:

- так, необходимо иметь в виду, что оценка горючести для МВ по методу I ГОСТ 30244-94 не только не совпадает с определением группы горючести по методу II ГОСТ 30244-94, но также не вполне обоснована, поскольку в составе МВ всегда имеются горючие вещества, и при огневом воздействии явно проявляются признаки их горения;
- теплопроводности материалов в исходном состоянии и в последующем при огневом (тепловом) воздействии будут существенно отличаться, в том числе для МВ это будет происходить за счёт теплопроводности воздуха, заполняющего объём, например, при изменении температуры от 20 до 850⁰С теплопроводность воздуха будет увеличиваться от 0,026 до 0,074 Вт / (м⁰К);
- для МВ, как для газопроницаемого материала, дополнительная теплопередача может происходить за счёт газообмена (пенетрации нагретого воздуха и горячих газообразных продуктов);
- потенциал огнестойкости по теплоизолирующей способности МВ существенно ниже, чем у ПИР материалов, поскольку кроме высокой теплопроводности для

неё установлена существенная теплопрозрачность (прозрачность для ИК-теплого излучения высокотемпературного источника) [5], поэтому актуально исследование возможности сохранения начальных преимуществ ПИР материалов в условиях пожара;

- объём воздуха, необходимый для сгорания органических веществ в 1 м³ материала для МВ существенно меньше, чем у ПИР;
- за счёт воздухопроницаемости во всём объёме минеральной ваты всегда имеется кислород, необходимый для начального окисления органических веществ, также может обеспечиваться воздухообмен для дальнейшего поддержания окисления;
- в условиях ограниченного воздухообмена (недостатка кислорода) для ПИР материалов огневое воздействие всегда будет приводить преимущественно к пиролизу (тепловому разложению) с образованием промежуточных продуктов;
- действие антипиренов, распределённых по объёму пенополимеров, будет эффективным, если они смещают реакции термического разложения в сторону уменьшения количества горючих продуктов, а также сами генерируют негорючие газы пропорционально количеству горючих продуктов;
- суммарные теплоты сгорания МВ и ПИР материалов имеют один порядок при одинаковом ограниченном притоке воздуха (в приведённом табличном примере соответственно 1,9 и 2,8 МДж/м³/м³), т.е. могут быть одного порядка и тепловые эффекты при огневых испытаниях сравниваемых материалов;
- в условиях реального пожара при оценке 1,9 и 2,8 МДж/м³/м³ суммарный тепловой эффект от МВ может быть даже больше, чем на объекте с ПИР, поскольку проектная толщина МВ до двух раз больше, конечно, если обосновано учитывается старение МВ, теплопроводность во влажном состоянии, воздухопроницаемость, в том числе, влажного воздуха;
- начальная теплопроводность у ПИР материалов с частично открытыми порами выше, чем у ПИР с закрытыми порами, однако при огневом воздействии определённая газопроницаемость (пониженное сопротивление воздухопроницанию) может обеспечивать положительный эффект, который более подробно будет рассмотрен в следующем разделе, а здесь укажем, что именно ПИР «Арианит», который является частично воздухопроницаемым пенополимером, относится к группе слабогорючих строительных материалов (Г1).

Таблица 1

Примеры теплотехнических и пожарно-технических характеристик

Характеристики	Теплоизоляционные материалы					
	на основе из минеральной ваты		модификации пенополиизоцианурата			
	МВ ⁵	МВ с праймером	ПИР «Арианит» с обкладками ⁶	ПИР «Арианит» без обкладок ⁷	ППИ ⁸	ПИР (Г4)
Плотность, ρ, кг/м ³	90±10%*	109...117	47...50	47...50	40...45	33...35
Содержание органических веществ, % масс	≤4,5*	4.5...7	97...98 - без обкладок	97...98	97...98	100
Оценка горючести по методу I ГОСТ 30244-94	НГ	НГ	горючие строительные материалы			
Потеря массы образца по методу I ГОСТ 30244-94	8...9	12...14	82...92 – без обкладок	82...92	89...95	94...98
Масса остатка ⁹ , % при температуре 850 ⁰ С	92	84	-	3,9	2,7	2,1
Определение группы горючести по методу II ГОСТ 30244-94	Г1	Г1	Г1	Г1	Г2	Г4
Группы воспламеняемости по стандарту ¹⁰	В1	В1	В1	В2	В2	В3

⁵ Сертификат соответствия С-RU.ПБ01.В.01356. Срок действия с 14.06.2011 по 14.06.2016 // Плиты теплоизоляционные из минеральной (каменной) ваты: ВЕНТИ БАТТС, изготовитель: ЗАО "Минеральная вата".

⁶ Сертификат соответствия С-RU.ПБ01.В.03013. Срок действия от 11.03.2015 до 11.03.2020 // Утеплитель марки АРИАНИТ на основе модифицированного пенополиизоцианурата (высокоиндексного ПИР) с добавками антипиренов, с обкладками алюминиевой фольгой, изготовитель: ЗАО "Ариада".

⁷ Сертификат соответствия С-RU.ПБ01.В.03012. Срок действия от 11.03.2015 до 11.03.2020 // Утеплитель марки АРИАНИТ на основе модифицированного пенополиизоцианурата (высокоиндексного ПИР) с добавками антипиренов, изготовитель: ЗАО "Ариада".

⁸ Сертификат соответствия С-RU.ПБ01.В.00781. Срок действия от 04.08.2010 до 04.08.2015 // Утеплитель ППИ пенополиизоциануратный, изготовитель: ЗАО "Ариада".

⁹ ГОСТ Р 56721-2015. Пластмассы. Термогравиметрия полимеров. Часть 1. Общие принципы. Введ. 2017-01-01. М. ФГУП Стандартиформ. 2016. 12 с.

¹⁰ ГОСТ 30402-96. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость. Введ. 1996-07-01. М. ГУП ЦПП. 1996. 27 с.

Характеристики	Теплоизоляционные материалы					
	на основе из минеральной ваты		модификации пенополиизоцианурата			
	МВ ⁵	МВ с праймером	ПИР «Арианит» с обкладками ⁶	ПИР «Арианит» без обкладок ⁷	ППИ ⁸	ПИР (Г4)
Коэффициенты теплопроводности: λ_0 (λ_{10} , λ_{20} , λ_{25}) Вт / (м °К)	0,035 (λ_{10})* 0,037 (λ_{25})*	0,042 (λ_{10})* 0,044 (λ_{25})* 0,046 (λ_0)*	0,030 (λ_0)**	0,026 (λ_{20})** 0,024 (λ_{25})**	0,022 (λ_0)	0,018 (λ_0)
λ_A , Вт / (м °К)	0,038*	-	0,030**	0,026**	-	-
λ_B , Вт / (м °К)	0,040*	-	0,031**	0,027**	-	-
Водопоглощение, кг/м ²	<1,0*	<1,0*	0	0,04...0,08**	0	0
Доля закрыты пор, %	-	-	74	74	90	97
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	≥0,3*	≥0,53*	-	-	-	-
Сопротивления воздухопроницанию (при толщине 100 мм), м ² ч Па / кг	<4	-	70	70	>2000	>2000
Оценка объёма воздуха, необходимого для сгорания органических веществ в 1 м ³ материала, м ³ /м ³	34	67	450	450	360	297
Теплота сгорания, МДж/кг	-	16,8 праймера	-	25,86	-	-
Оценка количества тепла при притоке 1 м ³ воздуха, МДж/м ³ /м ³	-	1,9	-	2,8	-	-
Теплопрозрачность [5] в ИК-диапазоне – 3...5 мкм, излучения от источника с температурой 650°C, мм	14,5	-	-	6,2	9,3	-

Данные без сносок получены в рамках собственных исследований:

* - <http://www.rockwool.ru/>;

** - протокол от 28.05.2015 №1/(4-09-0/7-15) ИЦ СПбГ АСУ (190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д.4);

*** - протокол от 18.11.2014 №32 ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (190005, Санкт-Петербург, Московский пр., 19);

[-] - данные отсутствуют.

3. Поверхностные эффекты

Конструктивно-технологические решения формирования и отделки поверхности теплоизоляционных материалов могут оказывать существенное влияние на процессы горения. Приведём три примера причин и соответствующих сценариев.

Пример 1. Теплоизоляционные материалы на основе минеральной ваты в качестве горючих компонентов в своём объёме содержат связующие вещества, в том числе, фенолформальдегидные смолы, также гидрофобизирующие, биоцидные добавки и т.д., дополнительно на поверхности может применяться праймер (см. рис. 1), он служит для клеевого соединения с обшивками сэндвич-панелей, обкладками или с другими конструктивными элементами. Такое технологическое решение приводит к образованию поверхностного слоя с высокой концентрацией горючих веществ.



Рисунок 1. Неповреждённый образец МВ (ламель с праймером, который нанесён продольными параллельными полосами) во время измерения электрического сопротивления на поверхности: $R > 20$ ГОм (рис. авт.)

На фотографии (рис. 1) кроме исследуемого теплоизоляционного материала показан момент измерения электрического сопротивления с помощью мегометра. Это связано с тем, что далее оценку повреждений теплоизоляционных материалов будем проводить с контролем электропроводности [6]. Касательно результата измерения, зафиксированного на фотографии, отметим высокую диэлектричность слоя, пропитанного праймером. Отсутствие электропроводности аналогично установлено для исходных (неповреждённых) образцов МВ и ПИР.

Пример 2. Следующая конструктивно-технологическая особенность связана с обкладками, которые часто применяют для защиты основы (тела) теплоизоляционных материалов от внешнего воздействия, в том числе, для уменьшения газообмена и доступа кислорода воздуха (рис. 2).



Рисунок 2. Примеры обкладок пенополимеров: а – гладкой алюминиевой фольгой, б – алюминиевой формованной фольгой с шагреньевым тиснением (рис. авт.)

Обкладки могут выполняться из горючих материалов (бумага, плёнка) или из материалов, которые при высоких температурах способны взаимодействовать с основой. Важно, что термографирование [7] при испытании некоторых образцов ПИР с формованной фольгой (рис. 2б) выявило температурные аномалии на поверхности (повышение локальной температуры до 1300°С при температуре огневого воздействия 850°С). В указанных случаях применение фольги лёгких сплавов способствовало развитию процесса горения.

В отличие от формованных обкладок (рис. 2б) гладкая алюминиевая фольга (рис. 2а) при огневом воздействии, как правило, просто оплавляється, и температурные аномалии не возникают.

Здесь укажем следующие возможные причины неблагоприятного влияния обкладок:

- развитая поверхность тонких обкладок из лёгких сплавов способствует их окислению кислородом воздуха с выделением дополнительного количества тепла;
- применение праймера под обкладками также способствует взаимодействию материала обкладок с другими компонентами системы;
- наличие обкладок из лёгких сплавов с развитой поверхностью может приводить к образованию термитной смеси с высокой температурой горения (до 2700°) и

(или) каталитическому (термокаталитическому) действию, например, образующегося оксида алюминия.

Выявленный эффект взаимодействия обкладок и теплоизоляционного материала указывает на необходимость постановки самостоятельного испытания для каждого вида подобной продукции.

Защита теплоизоляционных материалов от внешнего воздействия в виде обшивок из негорючих материалов (стали, меди в сэндвич-панелях) также не исключает взаимодействия с основой. Во-первых, сохраняется теплоотдача, которая зависит от свойств обшивок. Во-вторых, металлические обшивки могут иметь гальванические и полимерные покрытия, также способные участвовать в тепломассообменных процессах и в химических реакциях с праймером или основой.

Пример 3. Во многих случаях отрицательные явления на поверхности теплоизоляционных материалов могут быть компенсированы путём применения поверхностных добавок или антипиренов (см. рис. 3) [8].

С точки зрения оптимизации технологии, конструкции и экономических показателей для снижения пожарной опасности поверхностные слои и объёмные добавки должны выполнять разные функции.

Целеноправленное формирование поверхностных слоёв может быть реализовано введением добавок в пенополимерную систему вблизи обшивок (обкладок), также введением добавок в праймер или путём предварительного нанесения на обшивки (обкладки).

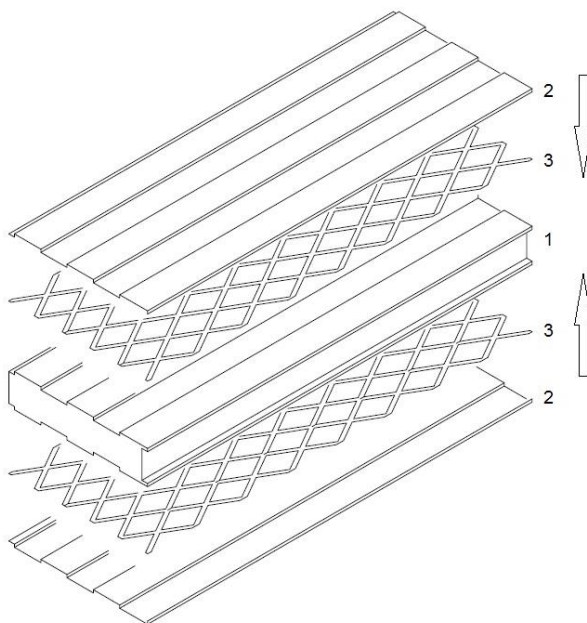


Рисунок 3. Схема соединения слоёв сэндвич-панели с функцией пожаротушения:
1 – теплоизоляционный материал, 2 – обшивки из стального листа (обкладки из фольги),
3 - слои огнетушащих добавок (антипиренов) [8]

Механизмы работы поверхностных и внутренних добавок отличаются из-за разного присутствия кислорода воздуха и его участия в деструкции. В поверхностных слоях в большей степени требуется смещение термоокислительных реакций в сторону образования негорючих продуктов. В объёме материала требуется контролировать процессы пиролиза и коксования.

Эффективность поверхностных слоёв (огнетушащих порошков, микрокапсул огнетушащего вещества и т.п.) существенно выше, чем у антипиренов, равномерно распределённых в объёме теплоизоляционного материала. При огневом воздействии слой огнетушащих добавок 3 выделяет огнетушащие вещества и/или деформируется, возникающее давление приводит к отслоению обшивки 2. В результате возникает зазор между обшивкой 2 и теплоизоляционным материалом 1, уменьшается теплоотдача, за счет подавления процесса горения и уменьшения подвода тепла в зону горения уменьшается термическое разложение основы.

Напротив, генерация огнетушащих газов в объёме может приводить к образованию трещин, развитию окисляемой поверхности, вторичному возгоранию и распространению горения. Таким образом, некоторые поверхностные добавки при необоснованном применении в объёме могут приводить к увеличению пожарной опасности.

К наиболее полезным функциям поверхностных слоёв (добавок) также можно отнести снижение теплопроводности за счёт спекания (образования оболочки), а также исключение трещин в оболочке за счёт её пластичности при высоких температурах.

4. Масштабный фактор

Условно выделим три масштаба огневых испытаний: лабораторные, стендовые и натурные. Рассмотрим, какие механизмы повреждения теплоизоляционных материалов могут быть определены в зависимости от масштабного фактора.

На фотографиях (рис. 4, 5) зафиксированы лабораторные испытания МВ и ПИР образцов по методу I ГОСТ 30244-94.

В ходе испытаний представленного образца минеральной ваты внешних изменений (горения) не наблюдалось (рис. 4а). Из-за малой массы образца (около 7 г) в рамках стандартной оценки результатов никаких особенностей не выявлено. Материал отнесён к негорючим (НГ). За рамками стандартной оценки следует отметить существенное изменение электропроводности (рис. 4 б, в), до испытания материал был диэлектриком, вследствие теплового воздействия он стал проводником. Повреждение материала, связанное с выгоранием органических связующих веществ, для представленного лабораторного испытания может быть выявлено только на основании дополнительного исследования.

При испытании образца ПИР (с массой около 4 г) в рамках стандартной оценки зафиксировано устойчивое пламенное горение продолжительностью 60 сек (рис. 5а). В соответствии с методом I материал отнесён к горючим. Дополнительное исследование (рис. 5 б, в) также выявило появление электропроводности у повреждённого материала. Длительное горение может быть объяснено недостатком кислорода в объёме образца из-за ограниченной воздухопроницаемости материала. Образование промежуточных продуктов в таком лабораторном испытании наблюдать невозможно.

Другой лабораторный метод, испытание на воспламеняемость по ГОСТ 30402-96, в рамках стандартной оценки также не позволяет выявить механизм повреждения теплоизоляционных материалов. В лабораторных установках для материалов из группы воспламеняемости В1 сложно заметить даже само горение (см. рис. 6), имеет место только некоторое изменение пламени внешнего источника - подхватывание и расстилание огня по поверхности минеральной ваты (см. рис. 6 б, г). Однако, дополнительный контроль электропроводности и в этом случае показывает, что материал образца из-за теплового воздействия из диэлектрика стал проводником (см. рис. 7), поскольку связующие компоненты сгорели, причём химическая реакция прошла практически по всей толщине образца.

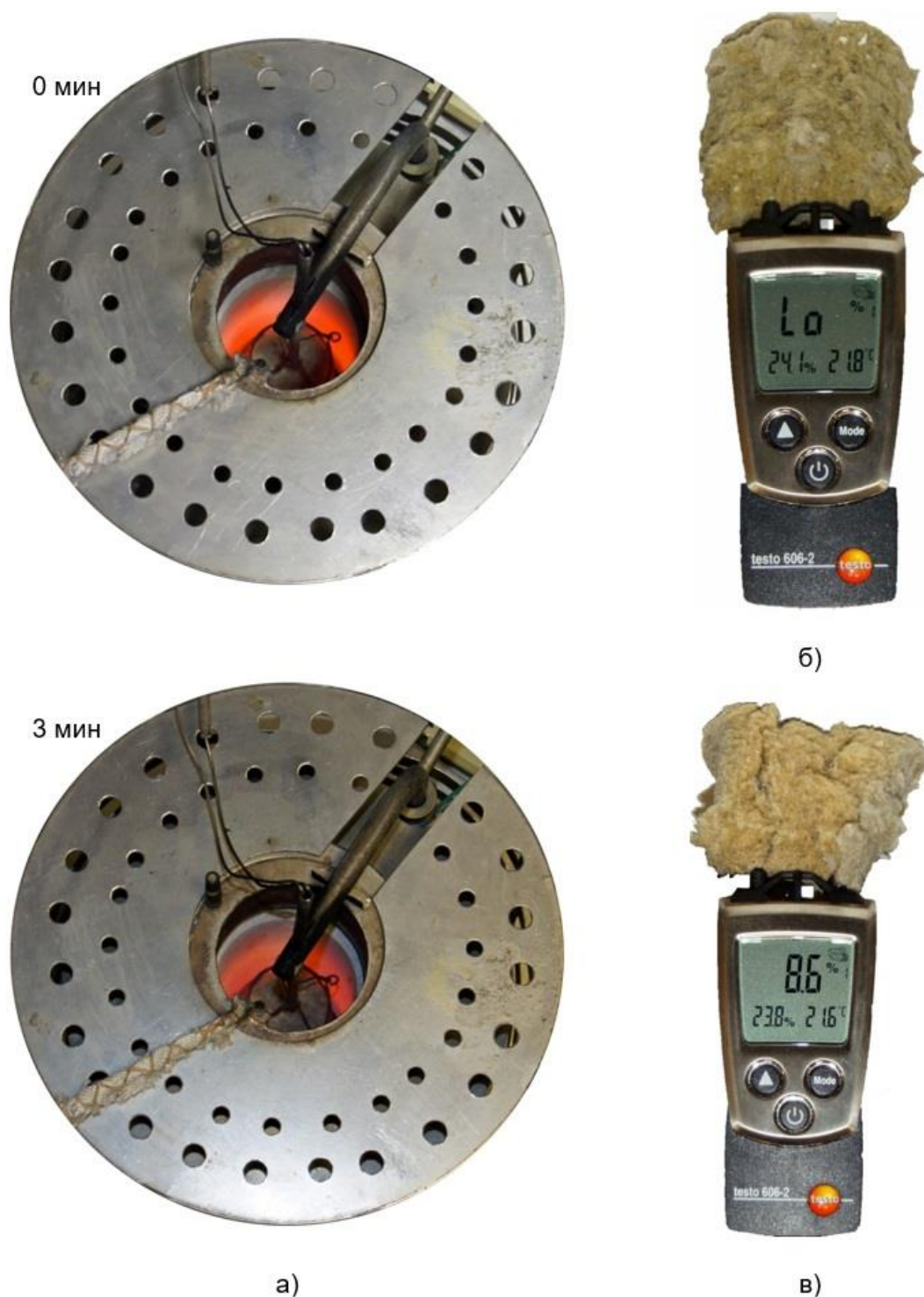


Рисунок 4. Состояния образца МВ: а - в печи во время испытания на горючесть по методу I ГОСТ 30244-94: а – в момент установки в печь и через 3 мин. с начала испытания; б – при оценке электропроводности прибором Testo-606-2 до испытания (электропроводность материала отсутствует), в – тоже после испытания (выявлена электропроводность) (рис. авт.)

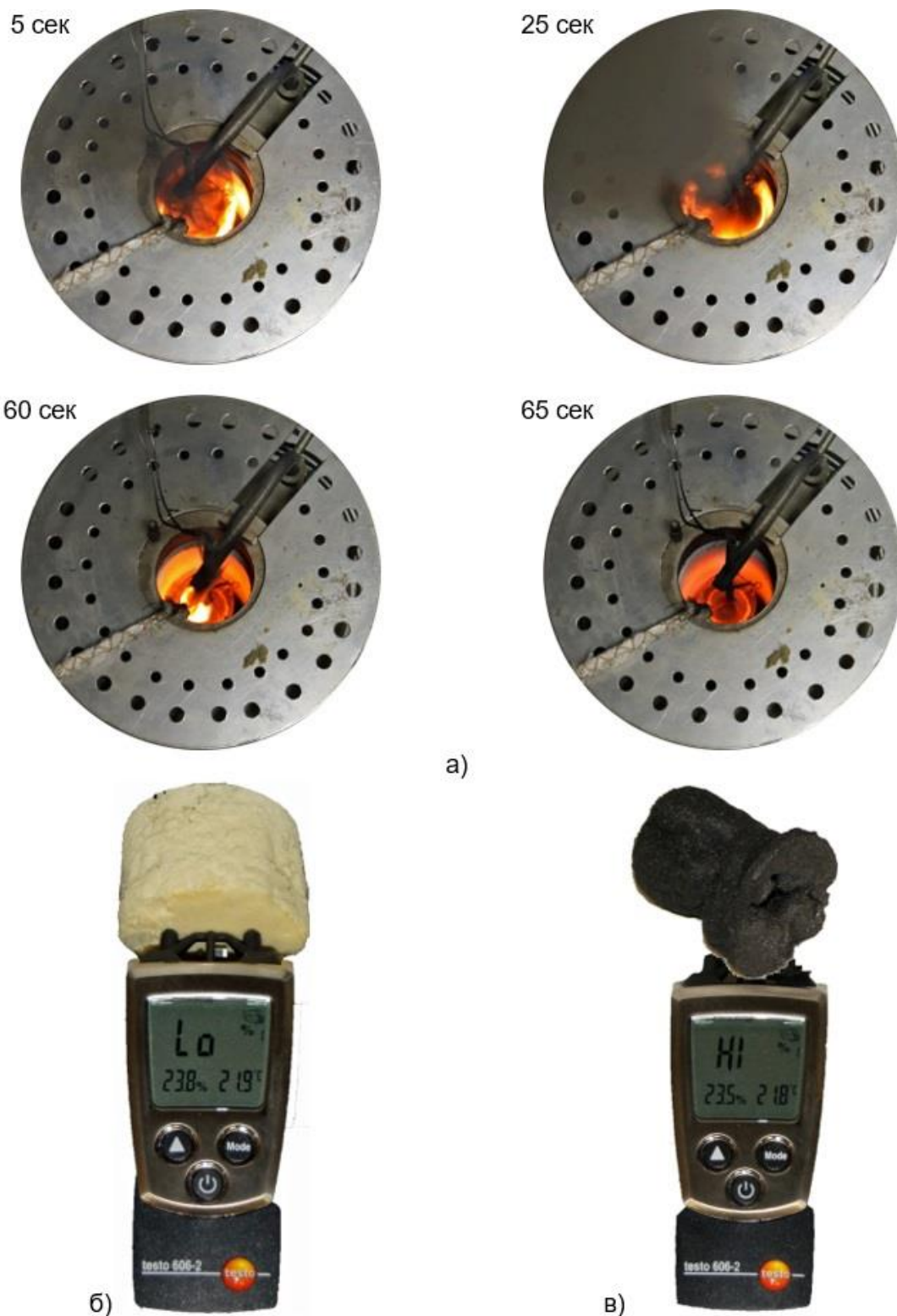


Рисунок 5. Состояния образца ПИР из группы горючести Г1: а – в печи во время испытания на горючесть по методу I ГОСТ 30244-94 через 5, 25, 60 и 65 сек с момента установки в печь; б – при оценке электропроводности прибором Testo-606-2 до испытания (электропроводность материала отсутствует), в – тоже после испытания (выявлена высокая электропроводность) (рис. авт.)

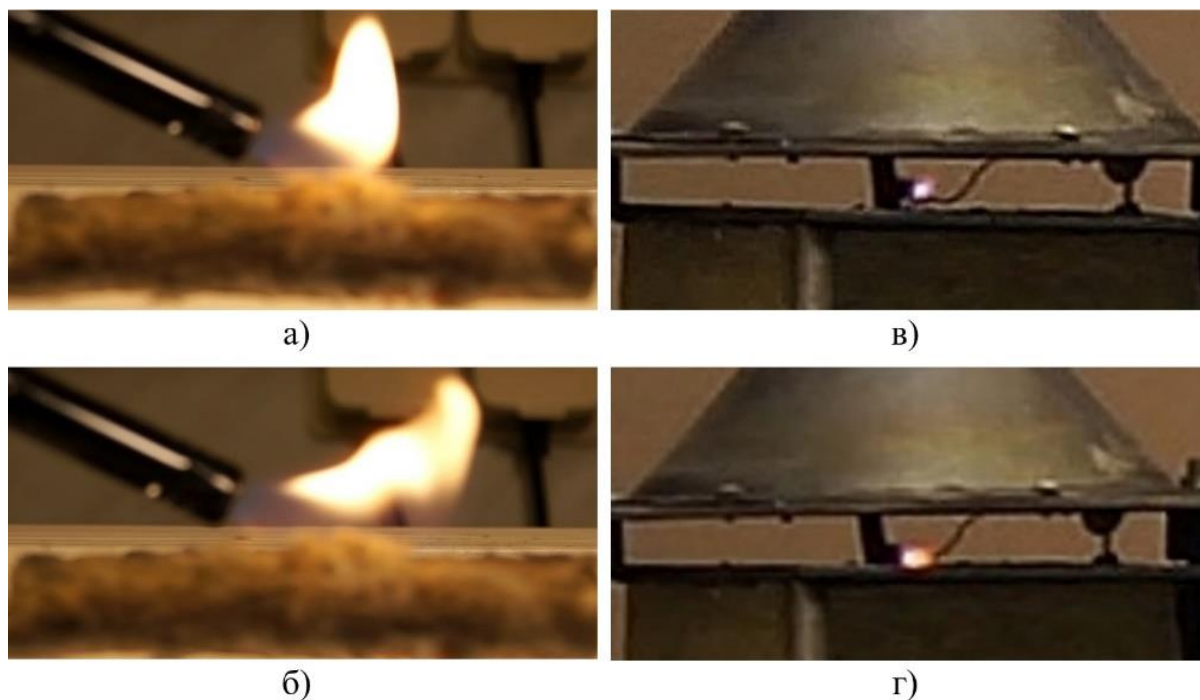


Рисунок 6. Примеры изменения горения пламени внешнего источника у поверхности минеральной ваты за счёт паров связующих веществ при их содержании в материале - 4,2%: а, б – при подводе газовой горелки к образцу, нагретому до 100°C, в, г – тоже при испытании на воспламеняемость по ГОСТ 30402-96 (рис. авт.)



Рисунок 7. Разрез образца MB, повреждённого при стандартном испытании на воспламеняемость по ГОСТ 30402-96. Контроль прибором Testo-606-2 показывает электропроводность по всей толщине теплового воздействия (рис. авт.)

Наиболее информативным среди лабораторных является метод II ГОСТ 30244-94. На примере испытания ПИР материала (рис. 8) уже в рамках стандартной оценки можно установить структуру материала повреждённого образца (см. рис. 8б), а также по изменению температуры дымовых газов (см. рис. 8в) судить о развитии процесса горения. Например, можно предположить, что в результате изменения структуры материала на 2-й минуте

началось его более интенсивное горение, вследствие этого наметившееся снижение температуры (прекращение горения) перешло в дальнейший рост.

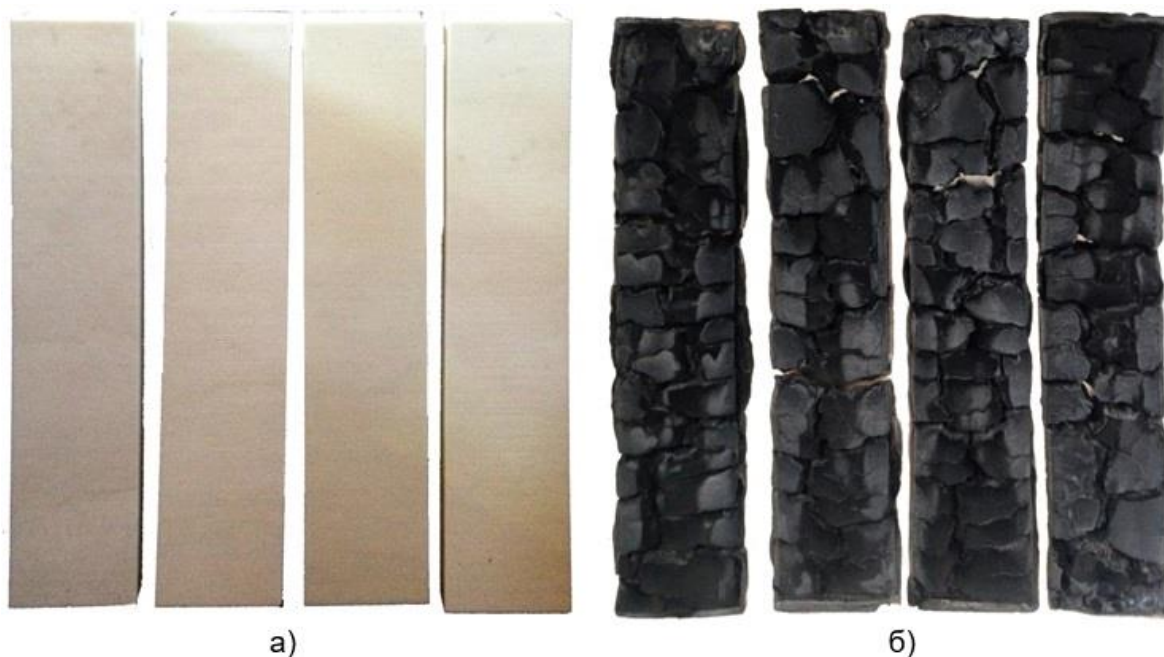
Стендовые испытания строительных конструкций по ГОСТ 30403-2012, ГОСТ 30247.1-94¹¹ позволяют выявить горение промежуточных продуктов (см. рис. 9), а стандартное обследование образцов включает определение некоторых показателей повреждений теплоизоляционных материалов (по длине и глубине).

Следует отметить, что согласно ГОСТ 30403-2012 горение продолжительностью более 5 сек., как газов, выделяющихся при термическом разложении, так и расплава, существенно ограничивает область применения многих теплоизоляционных материалов, поскольку содержащие их конструкции относятся к классу пожарной опасности КЗ. По указанной причине применение в конструкциях материалов даже из группы горючести Г1, Г2 чаще всего не может обеспечить требования по ограничению пожарной опасности строительных конструкций, и особенно покрытий.

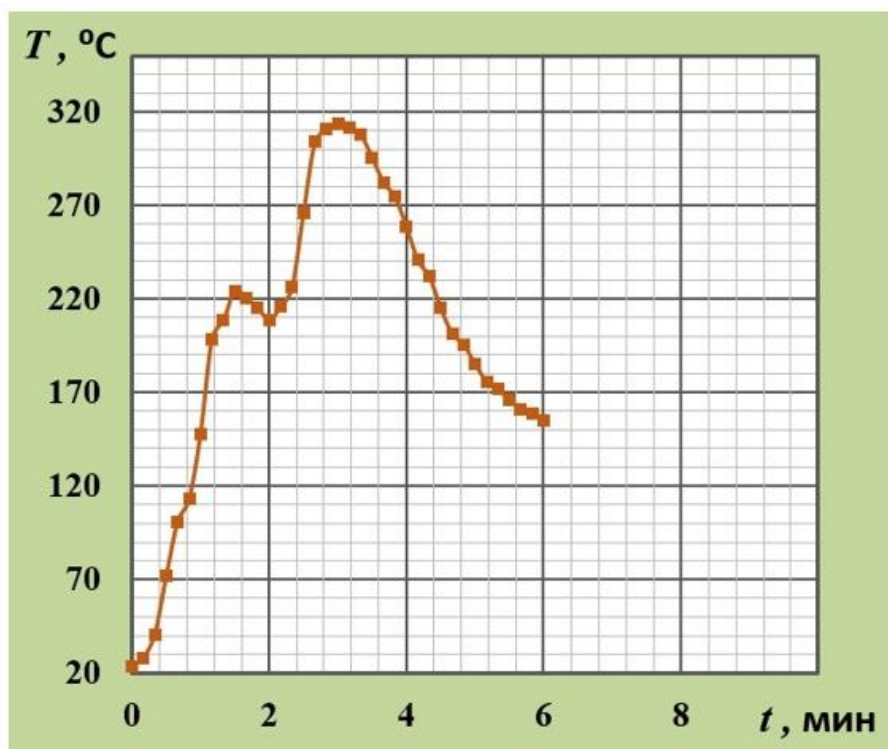
Горение промежуточных продуктов среди параметров пожарной опасности приходится учитывать в первую очередь даже при самых незначительных размерах повреждений теплоизоляционных материалов.

Отсутствие корреляции между горючестью теплоизоляционного материала и пожарной опасностью строительной конструкции является следствием конструктивно-технологических решений и рассматриваемого масштаба огневого (теплового) воздействия.

Оценки испытаний МВ материалов наиболее чувствительны к масштабному фактору. Горение компонентов минеральной ваты становится явным при стендовых испытаниях (см. рис. 10). В данном примере при размере образца 3,1*3,1*0,1 м, плотности минеральной ваты 115 кг/м³ и содержании связующих 4,5% их общая масса (даже без учёта праймера) составляет около 5 кг. Это позволяет наблюдать распространение горения с соответствующим тепловым эффектом, отслеживать пиролиз и фазовые переходы органических веществ в горючую жидкую и (или) газовую фазу.



¹¹ ГОСТ 30247.1-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции. Введ. 1996-01-01. М. ИПК Издательство стандартов. 1995. 11 с.



в)

Рисунок 8. Образцы ПИР из группы горючести Г4 и типичные результаты испытаний на горючесть по методу II ГОСТ 30244-94: а – образцы до испытания, б – после испытания, в – изменение средней по четырём термодатчикам температуры дымовых газов во время испытания (рис. авт.)



а)



б)

Рисунок 9. Типичное выделение газов при термическом разложении пенополимерных материалов при огневом испытании строительных конструкций: а – выделение газов при испытании покрытия на пожарную опасность по ГОСТ 30403-2012, б – воспламенение газов на необогреваемой поверхности посредством факела на 10-й минуте испытания и горение газов продолжительностью более 5 сек, строительная конструкция относится к классу пожарной опасности КЗ(15) (рис. авт.)



Рисунок 10. Пример горения при испытании на огнестойкость стен из сэндвич – панелей с минеральной ватой по ГОСТ 30247.1-94. Вдоль стыка панелей заметны коричневые подтёки образующихся маслянистых горючих веществ (рис. авт.)

При натуральных огневых испытаниях фрагментов зданий, т.е. в условиях и масштабе, приближенных к реальным, могут быть отслежены практически все механизмы горения и повреждения образцов. Диапазоны температур и скоростей нагрева при натуральных испытаниях шире, чем при стендовых и лабораторных, экспертиза повреждений проводится для трёхмерных узлов и строительных конструкций, находящихся во всех пространственных положениях, одновременно оценивается возможность самостоятельного распространения горения по теплоизоляционным материалам из зоны непосредственного огневого воздействия в необогреваемые отсеки.

До недавнего времени считалось, что недостатком натуральных испытаний является сложность идентификации результатов, которые получали в различных условиях. Однако указанный недостаток был устранён путём стандартизации трёхмерной модели и модельного очага пожара [9, 10].

Следующий пример демонстрирует выделение МВ материалом горючих газов и их горение при натуральных испытаниях двухэтажного фрагмента здания (см. рис. 11). В динамике было видно, как продукты пиролиза и (или) фазового перехода связующих компонентов и праймера выходят из стыков строительной конструкции, а затем воспламеняются. Далее горение вдоль стыков становилось подобным горению на газовой горелке. Соответствующий тепловой эффект был зафиксирован термографами [7].



Рисунок 11. Пример горения газов на 14-й минуте при испытании по ГОСТ Р 56076-2014¹² двухэтажного фрагмента здания из сэндвич-панелей с минеральной ватой (рис. авт.)

¹² ГОСТ Р 56076-2014. Конструкции строительные. Конструкции из панелей с металлическими обшивками. Методы испытаний на огнестойкость и пожарную опасность. Введ. 2015-01-01. М. ФГУП Стандартинформ. 2014. 44 с.

5. Классификация повреждений

Предлагаемая классификация получена при обобщении сведений о результатах испытаний разного масштаба. Она основана на повторяемости качественных признаков (параметров) изменения формы и структуры образцов теплоизоляционных материалов.

Классификацией установлены два типа повреждений минеральной ваты (МВ1, МВ2) и десять типов повреждений пенополиизоциануратов (ПИР1...ПИР10) (см. табл. 2).

Таблица 2

Типы и параметры повреждений теплоизоляционных материалов

Тип	Изменение объема*	Изменение формы поверхности	Структура, порообразование	Пожарно-технич. характеристики**
МВ1	не более 10%	оплавление, выгорание	без расслоений	НГ, К0***
МВ2	не более 10%	однородная корка, обугливание, оплавление, выгорание	без расслоений	Г1, К1(15)
ПИР1	усадка	однородная корка (обугливание)	без расслоений	Г1, В1
ПИР2	увеличение до 15%	однородная корка (обугливание)	без расслоений	Г1, В2, В1 с фольгой К2(15), К0***
ПИР3	увеличение	Обугливание корки с трещинами	раковины	Г1, К3(15)
ПИР4			щели	Г3, В2, К2(15)
ПИР5	увеличение	равномерное вспучивание в тепловой зоне, обугливание и агломераты без трещин в огневой зоне	раковины	Г2, К1(15)
ПИР6			щели	Г2, К2(15)
ПИР7	увеличение	агломераты без трещин, обугливание	раковины	Г2, К3(15)
ПИР8			щели	Г2, К3(15)
ПИР9	увеличение	агломераты с трещинами, обугливание	раковины	Г3, К3(15)
ПИР10			щели	Г4, К3(15)

* - для зон, где нет выгорания и (или) оплавления материала;

** - лучшие значения, полученные для материалов и содержащих их конструкций, т.е. возможны иные сочетания (однозначной связи с типом повреждений нет);

*** - при испытании стен с внешней стороны по ГОСТ Р 31251-2008¹³ (45 мин) для навесных фасадных систем.

Рассмотрим примеры классифицируемых повреждений МВ и ПИР материалов при лабораторных, стендовых и натуральных испытаниях.

Типы повреждений МВ1, МВ2, ПИР1 вначале сравним для выявления особенностей повреждений пенополимеров и материалов с неорганической основой, относящихся к группе горючести Г1 (рис. 12).

¹³ ГОСТ Р 31251-2008. Стены наружные с внешней стороны. Метод испытаний на пожарную опасность. Введ. 2010-03-01. М. ФГУП Стандартинформ. 2010. 23 с.

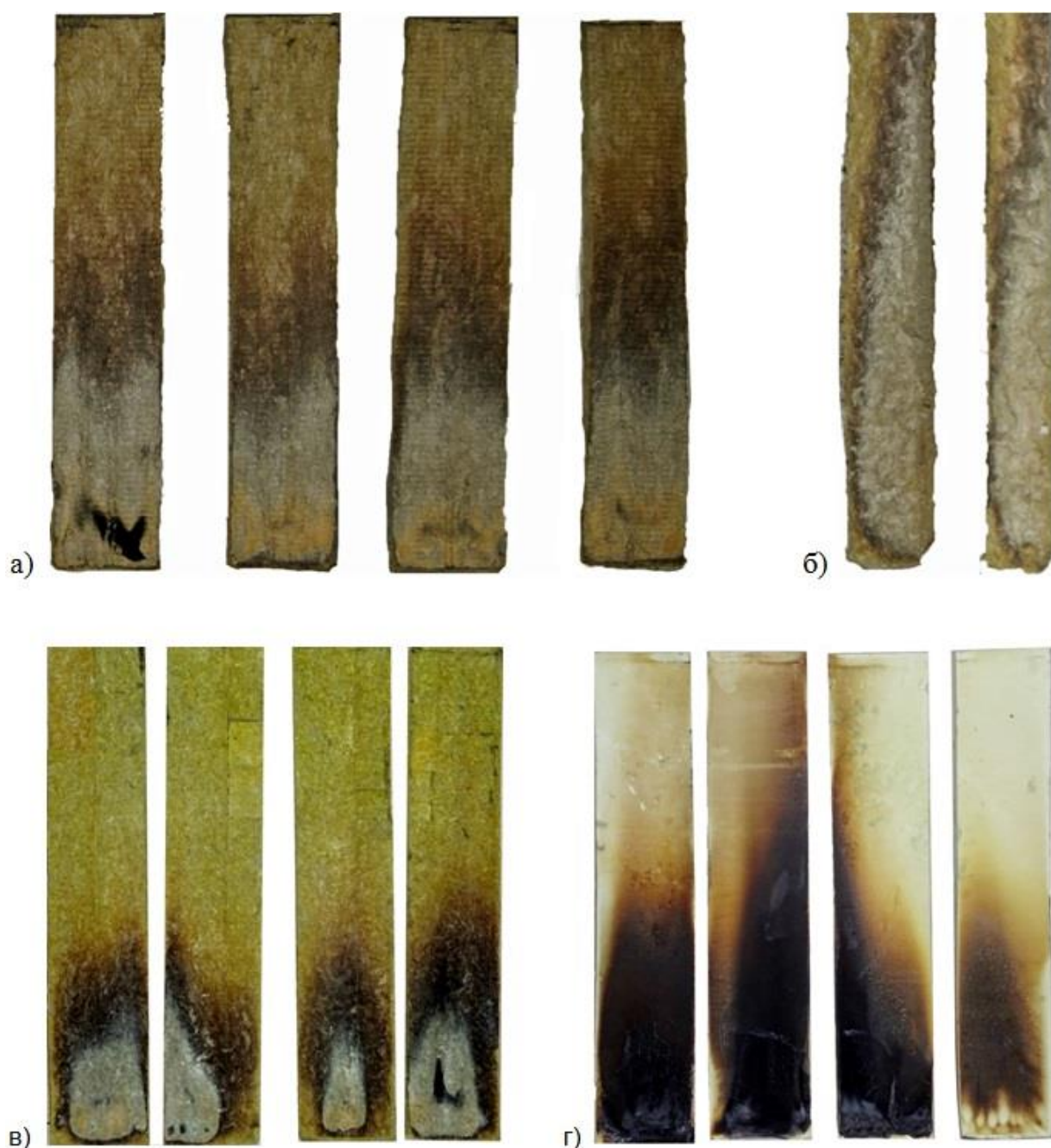


Рисунок 12. Повреждённые образцы материалов из группы горючести Г1 после испытания на горючесть по методу II ГОСТ 30244-94, типы повреждений: а – МВ1 при содержании связующих веществ 4,2% (вид спереди), б – тоже в продольном разрезе по зоне повреждения (изображение увеличено), в – МВ2 для минеральной ваты с праймером и содержанием связующих веществ 4,5% (вид спереди), г – ПИР1 (вид спереди) (рис. авт.)

При низком содержании связующих веществ минеральные волокна и зола связующих веществ (серого цвета) видны в зоне повреждения на поверхности (рис. 12а), а также по толщине образца, начиная от обогреваемой поверхности (рис. 12б). Такие повреждения относятся к типу МВ1.

Присутствие праймера на поверхности минеральной ваты приводит к его спеканию и образованию обугленной корки (рис. 12в, тип повреждения МВ2), в местах прямого огневого воздействия эта корка полностью выгорает, и обнажаются оплавленные минеральные волокна серого цвета.

Тип повреждений ПИР1 (рис. 12г) пенополимерного материала из группы горючести Г1 наиболее похож на повреждение минеральной ваты МВ2. В первую очередь заметно спекание на поверхности с образованием корки.

Формирование типов повреждений МВ1 и МВ2 сопоставим более подробно.

При ограничении мощности теплового потока и времени испытаний основным видимым признаком изменения МВ образца является обугливание по длине (высоте) и по глубине (см. рис. 13).



Рисунок 13. Повреждения МВ с праймером при испытании на пожарную опасность стены из сэндвич-панелей по ГОСТ Р 56076-2014. КERN теплоизоляционного материала отобран из контрольной зоны по длине образца, линейка приложена от начала контрольной зоны, время огневого воздействия – 15 мин, присвоенный класс пожарной опасности строительной конструкции – К1(15), тип повреждения – МВ2 (рис. авт.)

С помощью макросъёмки МВ образцов получены фотографии [11], на которых видно, что на неповреждённых участках связующие вещества (золотисто-жёлтого цвета) обволакивают волокна минеральной основы, и доступ кислорода воздуха обеспечен со всех сторон этих горючих веществ (рис. 14).



Рисунок 14. Срез неповреждённой части МВ образца под микроскопом (цифры соответствуют размеру в см). Содержание связующих веществ – 4,5% [11]

Высокая воздухопроницаемость минеральной ваты обеспечивает равномерное горение связующих веществ (подход воздуха и удаление образующихся газообразных продуктов, пара и дыма). Вначале горение происходит у поверхности (рис. 15), затем оно распространяется на значительную глубину (рис. 16), при этом волокна минеральной основы полностью обугливаются.



Рисунок 15. Срез частично повреждённого MB образца у поверхности под микроскопом (деления шкалы справа выполнены через 1 мм, тип повреждений – MB2) [11]



Рисунок 16. Срез повреждённого MB образца под микроскопом (цифры соответствуют размеру в см, тип повреждений – MB2) [11]

Эффект увеличения мощности и времени огневого (теплого) воздействия рассмотрим по результатам стендовых испытаний (см. рис. 17). Здесь для типа MB2 ещё более заметным становится спекание праймера и образование обуглившейся корки на поверхности, также глубокое обугливание по толщине и зола серого цвета в наиболее прогретых зонах, например, у стыков сэндвич-панелей, где органические вещества и корка полностью выгорают, в том числе, за счёт возможности локального воздухообмена и газообмена.

Сравнивая результат испытаний на горючесть (рис. 12в) и огнестойкость (рис. 17) можно сделать вывод о подобии повреждений и независимости типа повреждения MB2 от метода испытаний.



Рисунок 17. Повреждения типа MB2 при испытании на огнестойкость стены из сэндвич-панелей по ГОСТ Р 56076-2014 (время огневого воздействия – 30 мин). Стальная обшивка демонтирована (рис. авт.)

В случае натуральных испытаний (рис. 11) в зоне прямого огневого воздействия наблюдается следующая стадия повреждения по типу MB2, после выгорания корки оплавляется минеральная основа и выгорает до 50...80% по толщине за время - 15 мин (см. рис. 18), далее (при продолжительности пожара более 20 мин) минеральные волокна могут выгорать полностью, что наблюдалось во многих экспериментах.



Рисунок 18. Оплавление MB и выгорание при натуральных огневых испытаниях по ГОСТ Р 56076-2014 (стена фрагмента здания из сэндвич-панелей, время огневого воздействия – 15 мин, толщина повреждённого материала 50 мм при толщине до испытания – 100 мм, тип повреждений – MB2) (рис. авт.)

Из приведённых примеров видно, что существование двух вариантов повреждений (MB1 и MB2) является следствием наличия или отсутствием праймера, т.е. зависит от концентрации горючих веществ у поверхности образцов. Применение стальных обшивок не меняет характера повреждений. Выявленные типы повреждений наблюдаются также при размещении MB материалов внутри строительных конструкций, для каждого типа проявляются свои стадии повреждения в зависимости от теплоизолирующей способности ограждающих слоёв и интенсивности огневого воздействия.

Типы повреждений ПИР1, ПИР2. Разнообразие повреждений ПИР материалов связано с взаимным влиянием многих факторов: воздухопроницаемости (газопроницаемости), пластичности (хрупкости) повреждённого материала в нагретом состоянии, образования газов, реакции открытой поверхности материала на тепловое воздействие, теплопрозрачности самого материала и его промежуточных продуктов деструкции.

По изменению объёма (первому признаку типа повреждений) может иметь место усадка или вспучивание ПИР образца.

Рассмотрим более подробно повреждение типа ПИР1 (рис. 12г, 19). На общем виде и особенно в разрезе хорошо видно, что напротив места прямого огневого воздействия образуется вогнутая равномерно обугленная поверхность. Под обугленной коркой ПИР материал остаётся неповреждённым, а прямоугольная форма сечения деформируется без образования трещин на поверхности, т.е. материал при повышении температуры ведёт себя, как термопласт.

Отсутствие повреждений (расслоений, раковин, щелей) в теле материала свидетельствует о непрозрачности обуглившегося (спечённого) слоя (корки) для теплового излучения, также является следствием частичной газопроницаемости, что исключает деформацию материала изнутри газообразными продуктами.

К сожалению, исследованные модификации пенополимеров с типом повреждений ПИР1, имеющие наилучшие пожарно-технические показатели, с учётом других требований (санитарно-химических, теплотехнических и экономических) на данный момент нельзя считать оптимальными.

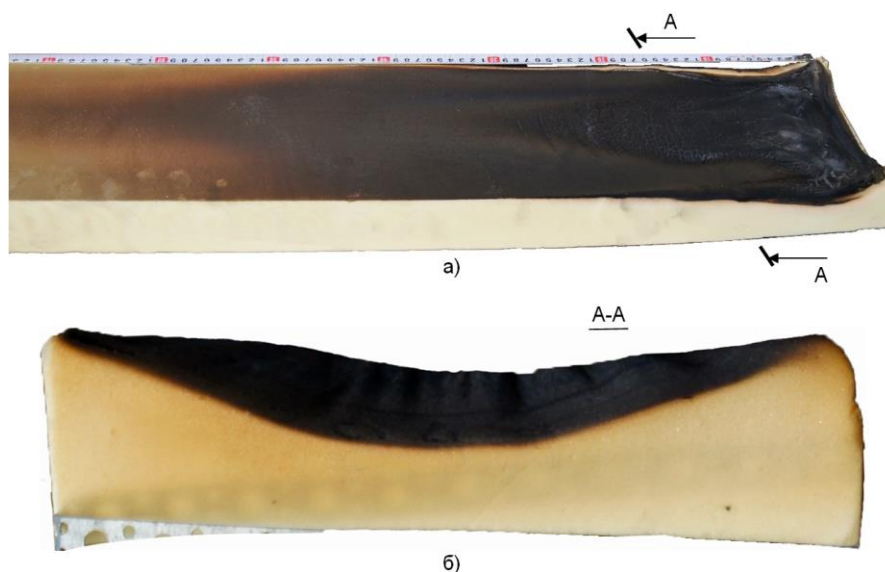


Рисунок 19. Повреждение типа ПИР1 при испытании на горючесть по методу II, ГОСТ 30244-94 (группа горючести – Г1): а – общий вид повреждённой части образца, б – разрез в месте наибольшего огневого воздействия (увеличено) (рис. авт.)

По совокупности показателей оптимальной оказалась другая сырьевая композиция и технология производства, которые позволили получить материал ПИР «Арианит» (группа горючести Г1)^{14, 15} со структурой повреждений ПИР2 (рис. 20, 21).

¹⁴ Сертификат соответствия С-RU.ПБ01.В.03013.

¹⁵ Сертификат соответствия С-RU.ПБ01.В.03012.

Сравнение с предыдущим типом повреждений показывает, что при структуре повреждений ПИР2 также образуется однородная обугленная корка, практически отсутствуют трещины на поверхности и расслоение материала внутри. Отличие заключается в незначительном увеличении объема вне зоны выгорания, особенно для ПИР материала сэндвич-панелей (рис. 21), также за коркой видно повреждение по толщине с заметным градиентом цвета от чёрно-коричневого до жёлтого (см. рис. 20в, 21б).

Характер повреждения типа ПИР2 не зависит от наличия или отсутствия стальных обшивок или алюминиевых обкладок, правда, для последних испытания были проведены только в варианте с гладкой (неформованной) фольгой, оплавливающейся и не взаимодействующей с теплоизоляционным материалом.

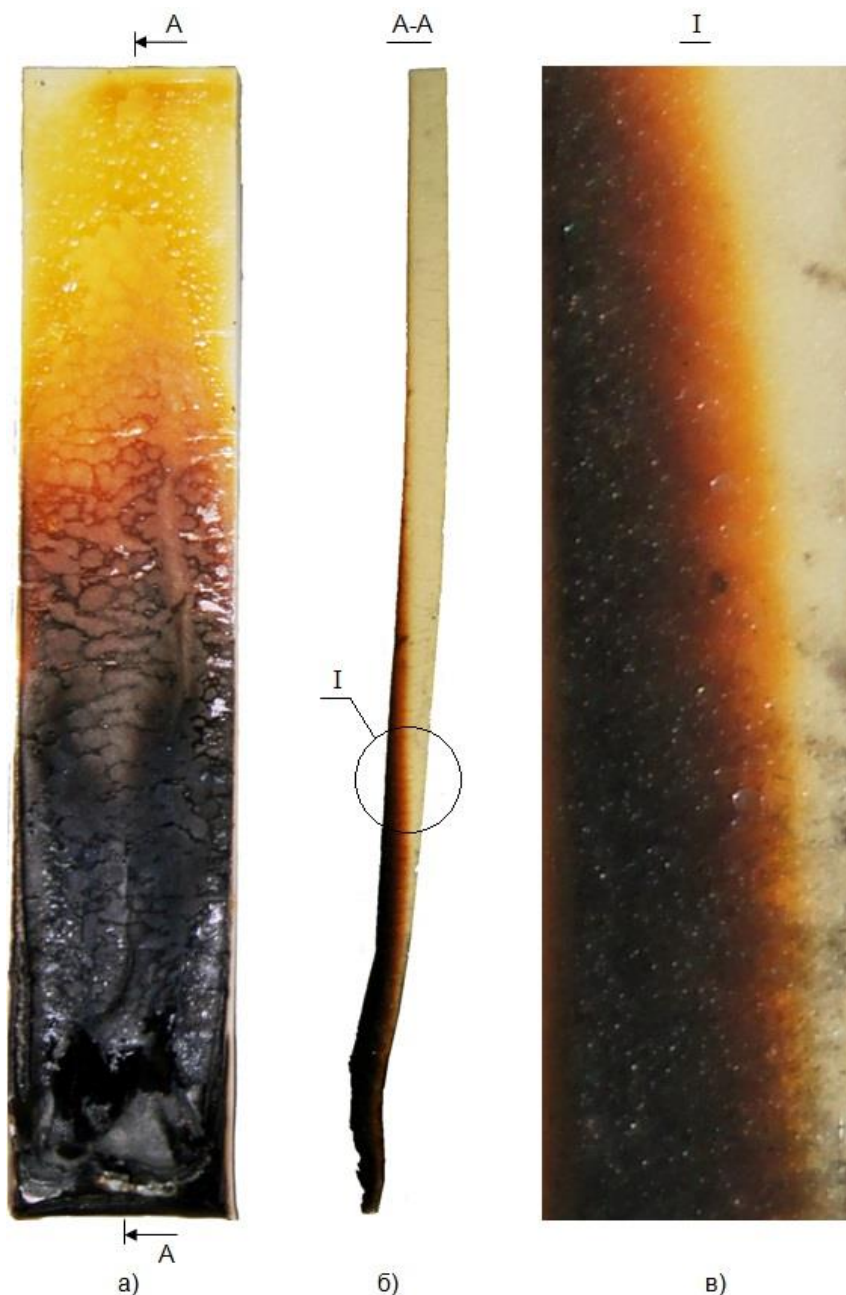


Рисунок 20. Повреждение типа ПИР2 при испытании на горючесть по методу II, ГОСТ 30244-94 образца ПИР «Арианит» (группа горючести – Г1): а – общий вид, б – продольный разрез, в – фрагмент продольного разреза (увеличено) (рис. авт.)

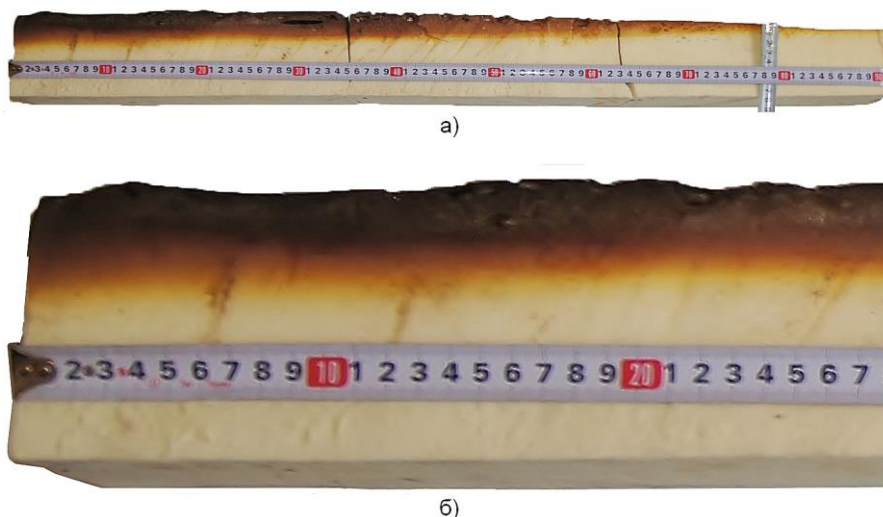


Рисунок 21. Повреждение типа ПИР2 при испытании на пожарную опасность по ГОСТ 30403-2012 стены из сэндвич-панелей с теплоизоляционным материалом ПИР «Арианит» (группа горючести – Г1). Класс пожарной опасности строительной конструкции – К2(15). Показан повреждённый теплоизоляционный материал, стальная обшивка демонтирована. На поверхности видна однородная корка: а – по всей длине в контрольной зоне, б – в начале контрольной зоны (увеличено) (рис. авт.)

Структура повреждений типа ПИР2 обусловлена газопроницаемостью материала, исключающей деформацию материала изнутри образующимися газообразными продуктами, а также удовлетворительными теплоизоляционными свойствами образующейся корки. Благодаря этому у пенополимера из группы горючести Г1 с типом повреждения ПИР2 во время испытания на горючесть температуры дымовых газов лишь незначительно превышают аналогичные температуры минеральной ваты (рис. 22). Вместе с тем, выделяющиеся при тепловом воздействии газы являются горючими, поэтому сам материал относится к группе воспламеняемости В2 (умеренновоспламеняемые), и только с обкладками из гладкой алюминиевой фольги соответствует требованиям по группе воспламеняемости В1 (трудновоспламеняемые).

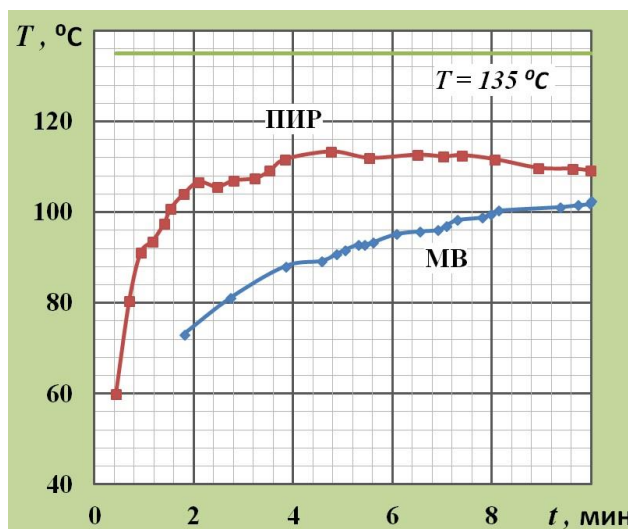


Рисунок 22. Изменение средней по четырём термометрам температуры дымовых газов во время испытания на горючесть по методу II ГОСТ 30244-94: образцов МВ с содержанием связующих 4,2% и ПИР «Арианит» (группа горючести – Г1, тип повреждения – ПИР2), линия температуры $T = 135^{\circ}\text{C}$ соответствует пределу для группы горючести Г1 (рис. авт.)

При типе повреждений ПИР2 материал в составе стен и покрытий из сэндвич-панелей имеет относительно увеличенные повреждения по длине и толщине (рис. 21а), а строительные конструкции из соответствующих сэндвич-панелей относятся к классу пожарной опасности К2(15).

При меньшей интенсивности огневого (теплового) воздействия, например, в ходе испытаний стен с внешней стороны длительностью 45 мин по ГОСТ Р 31251-2008, навесные фасадные системы с ПИР «Арианит» (тип повреждения ПИР2) относятся к классу конструктивной пожарной опасности К0 [12].

Типы повреждений ПИР3, ПИР4 имеют место при относительном снижении пластичности пенополимеров и уменьшении газопроницаемости, в этом случае объём увеличивается за счёт газообразных продуктов, на корке из-за неравномерности деформаций возникают трещины (рис. 23), под коркой образуются раковины (тип ПИР3 – рис. 24) или щели (тип ПИР4 – рис. 25).

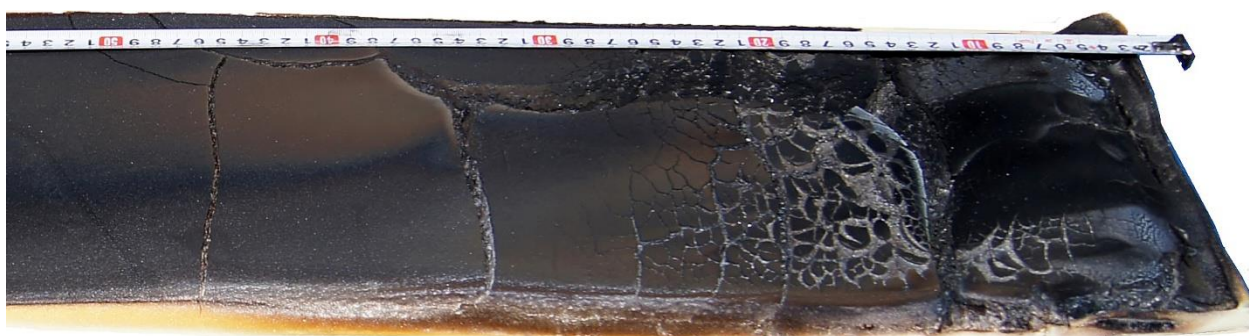


Рисунок 23. Тип повреждения ПИР3 – образец с характерным растрескиванием поверхности при испытании на горючесть по ГОСТ 30244-94 (группа горючести – Г1) (рис. авт.)

Пожарно-технические характеристики модификаций пенополимеров с типами повреждений ПИР3, ПИР4 чувствительны к технологии заливки и составу сырьевой композиции. Лучшие из таких теплоизоляционных материалов относятся к группе горючести Г1, однако содержащие их строительные конструкции, как правило, относятся к классам пожарной опасности К2, К3.

Поры в виде раковин произвольной формы (тип КМ3) не имеют определённой ориентации (рис. 24). Во всех исследованных случаях поры в виде щелей (тип КМ4) были вытянуты вдоль изотерм, т.е. повернуты широкой стороной навстречу тепловому потоку (рис. 25).

Типы ПИР3 и ПИР4 можно назвать структурами с комбинированной защитой, поскольку огневому и тепловому повреждению последовательно противостоят 2 слоя: корка с пониженной прозрачностью для ИК-излучения, и вспученный материал, теплоизолирующая способность которого поддерживается за счёт увеличения толщины.



Рисунок 24. Тип повреждения ПИР3 теплоизоляционного материала у начала контрольной зоны при испытании на пожарную опасность покрытия из сэндвич-панелей по ГОСТ 30403-2012, класс пожарной опасности КЗ(15). Стальная обшивка демонтирована. Стрелкой показано направление теплового потока над поверхностью (справа налево). Раковины ориентации не имеют, на поверхности - однородная корка (рис. авт.)

В образовании корки принимает участие сам ПИР материал, но способствовать образованию такого защитного слоя может и специальный праймер, в том числе, содержащий микрокапсулы или порошки с реагентами [8].

Наличие трещин на корке является причиной развития горения вглубь материала, но одновременно уменьшает выход горючих газов на необогреваемую сторону, т.к. промежуточные продукты попадают в зону огневого воздействия и сгорают на обогреваемой стороне образцов.

Комбинированное поведение структур ПИР3, ПИР4 обуславливает неустойчивое положение строительных конструкций с соответствующими материалами по параметрам пожарной опасности. Результаты их испытаний обычно приводили к присвоению класса пожарной опасности К2(15) для стен из сэндвич-панелей, и КЗ(15) для покрытий.



Рисунок 25. Тип повреждения ПИР4 теплоизоляционного материала у начала контрольной зоны при испытании на пожарную опасность стены из сэндвич-панелей по ГОСТ 30403-2012 (класс пожарной опасности строительной конструкции – К2(15), характеристики ПИР – Г3, В2, Д2, Т4, КМ5). Стальная обшивка демонтирована. Стрелкой показано направление теплового потока над поверхностью (справа налево). Щели наклонены навстречу теплому потоку (ориентированы по изотермам). На поверхности - однородная корка (рис. авт.)

Аналогичные по структуре повреждения для данной модификации материала получаем в разных условиях, например, при натуральных огневых испытаниях фрагмента навесного вентилируемого фасада с пенополимерным теплоизоляционным материалом (рис. 26). В этом эксперименте со стороны теплового воздействия поверхность образца покрылась коркой, а в разрезе видны щели, ориентированные по изотермам, т.е. параллельно поверхности.



Рисунок 26. Тип повреждения ПИР4 теплоизоляционного материала при натуральных огневых испытаниях фрагмента фасада со стальной облицовкой, расположенной с воздушным зазором 25 мм (на фотографии образец повернут в горизонтальное положение, облицовка не показана). Температура обогреваемой стороны облицовки – 920°C, время – 15 мин (рис. авт.)

Типы повреждений ПИР5 и ПИР6 возникают у вспучивающихся пенополимеров с закрытыми порами, наиболее пластичных при повышенных температурах, одновременно не склонных к реакциям сшивки, т.е. не участвующих в уплотнении с образованием корки на поверхности при огневом (тепловом) воздействии. Огнестойкость по теплоизолирующей способности при отсутствии корки может достигаться только за счёт увеличения толщины вспучивающегося слоя.

Особенность материалов с типами повреждений ПИР5, ПИР6 заключается в том, что при тепловом воздействии, например, в тепловой (контрольной) зоне при испытании на пожарную опасность на обогреваемой стороне вспучивание идёт равномерно по всей поверхности (рис. 27, 28).

Пластичность таких материалов исключает появление трещин не только в тепловой, но и в огневой зоне, где поверхность напоминает по форме спекшиеся агломераты.

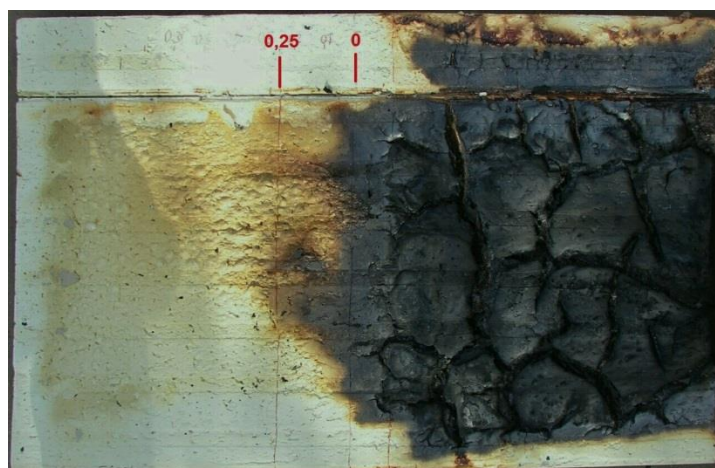


Рисунок 27. Повреждения типа ПИР5 в форме равномерного вспучивания в тепловой зоне (слева) и крупных агломератов без трещин (справа) над огневой камерой для перекрытия из сэндвич – панелей (стальная обшивка снята) при испытании на пожарную опасность по ГОСТ 30403-2012 (показана разметка контрольной зоны 0,25 и 0 м). Группа горючести ПИР материала – Г2, класс пожарной опасности конструкции – К1(15) (рис. авт.)

Для некоторых рассматриваемых модификаций ПИР также получено обратное сочетание пожарно-технических характеристик теплоизоляционного материала и содержащих его строительных конструкций из сэндвич-панелей. Например, при использовании ПИР материала из группы горючести Г2 был обеспечен класс пожарной опасности стен и покрытий - К1(15). Такое достижение явилось результатом совместного влияния структуры повреждений и добавок, уменьшающих концентрацию горючих промежуточных продуктов. При контроле с помощью факела воспламенения газов не происходило. Вспучивание поверхностного слоя и выделение газов, как указано в патенте [8], приводило к отслоению обшивки. Благодаря зазору между обшивкой и теплоизоляционным материалом уменьшалась теплоотдача и термическое разложение основы.

Судя по характеру повреждений, можно предположить, что изменение пористости по толщине повреждённого слоя происходило одновременно по всей толщине за счёт рассеяния теплового ИК-излучения. Роль кондуктивной (молекулярной) теплопроводности была минимальной.



Рисунок 28. Тип повреждения ПИР5 теплоизоляционного материала (группа горючести – Г2) сэндвич-панелей (стальная обшивка демонтирована), показанный вырез выполнен в контрольной зоне после испытания покрытия на пожарную опасность по ГОСТ 30403-2012, класс пожарной опасности строительной конструкции - К1(15) (рис. авт.)

Типы повреждений ПИР7, ПИР8 возникают при обильном выделении газообразных продуктов пиролиза структурой с замкнутыми ячейками, отсутствии поверхностного уплотнения (образования корки), высокой теплопрозрачности материала для ИК-излучения, но при условии сохранения значительной пластичности.

В результате газообразования в объёме такого пенополимера образуются раковины (тип ПИР7, рис. 29) или щели (тип ПИР8, рис. 30), при этом почти весь вспученный слой оказывается обугленным от действия теплового излучения.

Как и в предыдущем случае можно предположить, что роль кондуктивной (молекулярной) теплопроводности минимальна, поскольку размеры раковин и щелей мало зависят от положения по толщине повреждённого материала.

За счёт большого количества газов объём повреждённого газонепроницаемого слоя значительно увеличивается, а благодаря пластичности материала отсутствуют трещины, вспученный слой в разрезе напоминает волны, а поверхность имеет вид спёкшихся крупных агломератов (рис. 29). Эти образования отличаются от повреждений предыдущего типа тем,

что имеют место по всей поверхности повреждённого материала, в том числе, в зоне умеренного теплового воздействия.



Рисунок 29. Повреждение типа ПИР7 при испытании на горючесть по методу II ГОСТ 30244-94 (группа горючести – Г2). Образование на поверхности крупных агломератов без трещин, обугливание и вспучивание по объёму в форме мелких раковин (рис. авт.)



Рисунок 30. Повреждение типа ПИР8 в поперечном разрезе образца при испытании на горючесть по методу II ГОСТ 30244-94 (группа горючести – Г3). Образование на поверхности крупных агломератов (волн) без трещин, обугливание и вспучивание по объёму в форме щелей (рис. авт.)



Рисунок 31. Повреждения типа ПИР7 для поверхности в форме крупных агломератов без трещин со стороны огневого воздействия на стены (а) и покрытие (б) из сэндвич – панелей (стальные обшивки сняты) при испытании на огнестойкость по ГОСТ Р 56076-2014 (время огневого воздействия – 15 мин) (рис. авт.)

Рассмотрим характерное развитие повреждений на примере для типа ПИР8. Здесь в случае точечного длительного воздействия в условиях натуральных огневых испытаний возникает глубокое обугливание и увеличение объема за счёт пор в виде щелей (рис. 32).



Рисунок 32. Повреждение типа ПИР8 для материала сэндвич-панели при натуральных испытаниях с точечным огненным источником. Группа горючести – ГЗ. Температура обшивки на обогреваемой стороне – 921°С, время воздействия – 15 мин (рис. авт.)

Аналогичные повреждения типа ПИР8 имеем и в случае локального огневого воздействия (рис. 33). Здесь в направлении изменения огневого воздействия соответственно меняется толщина повреждённого слоя, но структура повреждений сохраняется, на всех фотографиях зафиксированы обугливание и увеличение объёма за счёт пор в виде щелей.





Рисунок 33. Повреждения типа ПИР8 теплоизоляционного материала (группа горючести – ГЗ) стены из сэндвич-панелей при натуральных огневых испытаниях фрагмента с локальным расположением пожарной нагрузки: а – вырез вдоль направления изменения интенсивности огневого воздействия, б, в, г – повреждения на участках минимального, среднего и максимального огневого воздействия соответственно (рис. авт.)

Типы повреждений ПИР9, ПИР10 являются наиболее распространёнными для массовой продукции большинства заводов (рис. 8б, 34, 35). Они характеризуются глубоким обугливанием материала с образованием агломератов и трещин между ними.

При толщине материала до 50 мм во время испытаний на горючесть по методу II ГОСТ 30244-94 трещины оказываются сквозными, и образец распадается на отдельные фрагменты.

Такие повреждения возникают у хрупких, непроницаемых для газа пенополимеров с высокой теплопрозрачностью, необратимые деформации которых имеют место из-за обильного выделения газов пиролиза, образования раковин (тип ПИР9, рис. 34) или щелей (тип ПИР10, рис. 35).

Растрескивание материала обеспечивает увеличение площади открытой поверхности, вовлечение в процесс горения свежих порций промежуточных продуктов, возникновение вторичных (внутренних) зон горения, соответственно, усиливает тепловой эффект и поддерживает рост температуры.

Рассматриваемые типы повреждений имеют продукты полимеризации базовых (дешёвых) полиолов и изоцианатов без добавок, также пенополимеры из неудачных сырьевых композиций, или нестабильные материалы, полученные с нарушением технологии заливки.

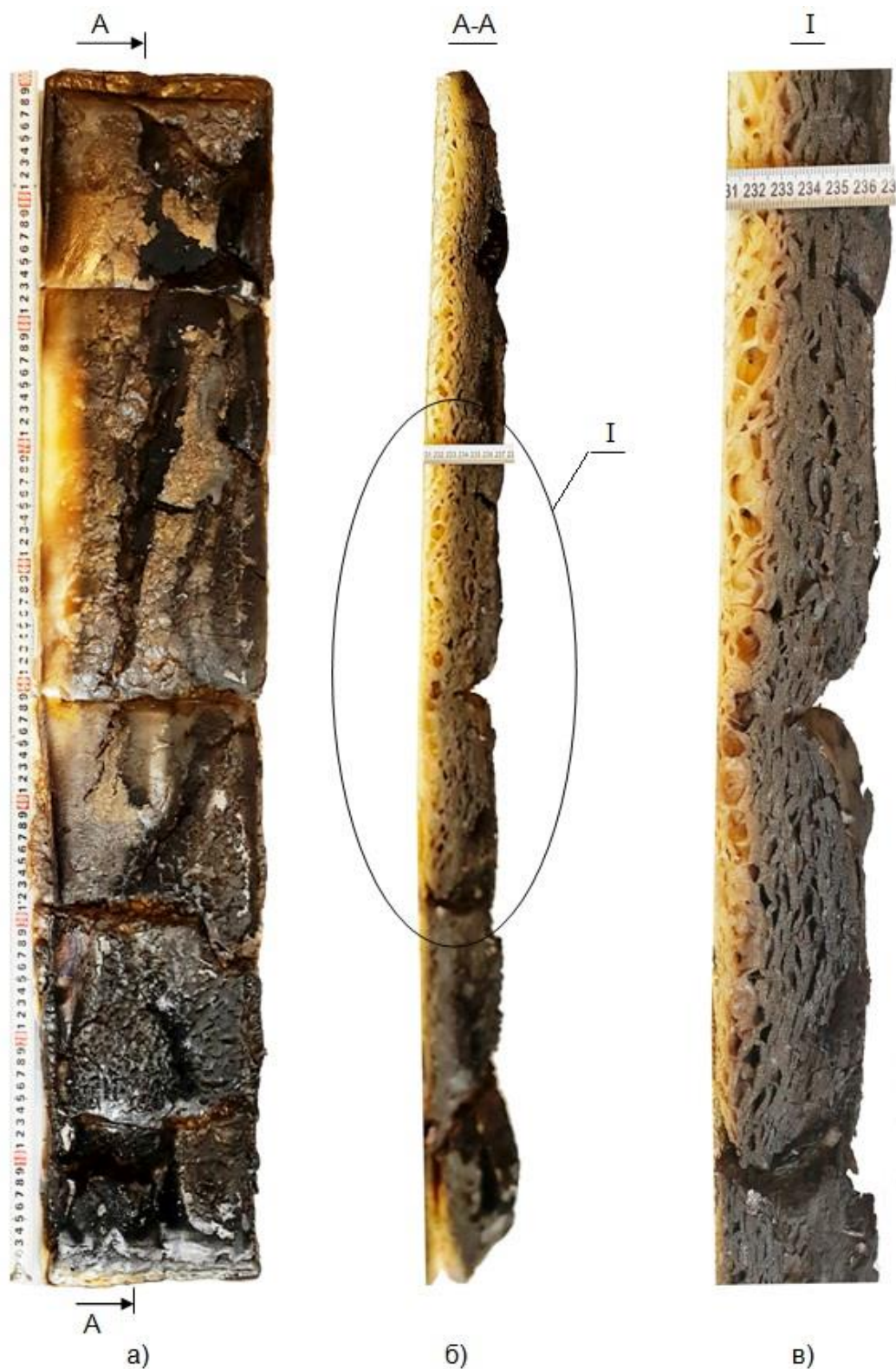


Рисунок 34. Тип повреждения ПИР9 для образца материала при испытании на горючесть по методу II ГОСТ 30244-94 (группа горючести – ГЗ...Г4). Образование агломератов и сквозных трещин, обугливание и вспучивание по объёму порами в форме раковин: а – общий вид образца, б – продольный разрез, в – тоже увеличено (рис. авт.)



Рисунок 35. Тип повреждения ПИР10 при испытании на горючесть по методу II ГОСТ 30244-94 (группа горючести – Г4). Поверхность образца рассечена сквозными щелями, зафиксировано вспучивание по объёму порами в форме щелей: а – общий вид образца, б – продольный разрез, в – тоже увеличено (рис. авт.)

Общие вопросы классификации

Действие механизмов развития или ограничения тепломассообменных физико-химических процессов существенно зависит от структуры повреждений. Из-за влияния структуры повреждений на распространение горения во многих случаях отсутствует корреляция между горючестью теплоизоляционных материалов и пожарной опасностью содержащих их конструкций.

Тем не менее, не является достаточным условием оптимизации выбор в качестве целевой функции определённой структуры повреждений из числа представленных типов (МВ1, МВ2, ПИР1...ПИР10), т.к. среди факторов пожарной опасности важную роль играют свойства продуктов деструкции (их горючесть, воспламеняемость, теплота сгорания).

Структура повреждений, как правило, сохраняется при развитии пожара. Если повреждённый материал не имел дополнительных механических повреждений, то возможна его идентификация и пожарно-структурная экспертиза распространения опасных факторов.

Увеличение объёма материала за счёт газообразования и роста размера пор в виде раковин или щелей всегда имеет разнонаправленное влияние на динамику развития повреждений, поскольку одновременно снижается теплопроводность, но увеличивается вероятность образования трещин.

Если в повреждённой структуре нет глубоких трещин, то горение внутри ПИР отсутствует из-за отсутствия кислорода.

В испытаниях на огнестойкость заметно существенное преимущество ПИР с расширяющейся структурой (с раковинами и щелями) в сравнении с нерасширяющимися материалами, в том числе, из минеральной ваты. Теплопроводность и теплопрозрачность ПИР материалов в условиях огневого и теплового воздействия существенно ниже, чем у МВ. Исключительно из-за недостаточной огнестойкости стыков пределы огнестойкости строительных конструкций с рассматриваемыми конкурирующими теплоизоляционными материалами одинаковы и, как правило, не превышают REI(30).

Ряд испытаний показал, что результаты пожарно-структурной экспертизы (также как результаты испытаний на горючесть, воспламеняемость, пожарную опасность и т.д.) из-за разных условий формирования участков и слоёв МВ и ПИР материалов могут отличаться для образцов, отобранных в разных направлениях, местах или по толщине. Например, для образцов без расслоений возможны локальные щели, аналогично для образцов с формой пор в виде щелей возможны раковины. Подобные свидетельства нестабильности, включений или переходных структур рекомендуется не учитывать, если их доля в объёме образца не превышает 10...20%, при больших значениях следует назначать другой класс по типу повреждений.

6. Дополнительные методы испытаний.

Заводской контроль качества теплоизоляционных материалов по пожарно-техническим характеристикам рекомендуется проводить периодически, а также при изменении технологического процесса и замене компонентов сырья.

По мнению авторов, достаточным условием идентификации и подтверждения соответствия будет применение двух лабораторных установок: «Шахтная печь» для определения горючести (Г1...Г4) по методу II ГОСТ 30244-94 и «ВСМ» для определения воспламеняемости строительных материалов (В1, В2, В3) по ГОСТ 30402 – 96.

Дополнительные методы испытаний предлагаются для усиления доказательной базы, также для экспертизы отклонений характеристик материалов от нормативных значений, решения задач оптимизации в случае разработки новых технологий и сырьевых композиций.

Информативность и доступность (низкая себестоимость) явились критериями выбора двух лабораторных испытаний: «Теста на электропроводность» и «Теплового теста» («Теста 200»).

«Тест на электропроводность» позволяет использовать средства объективного контроля в таких спорных для экспертизы случаях, как определение размера повреждений [6]. К сожалению, положение границ повреждений действующими стандартами предлагается определять визуально.

Согласно п. 7.6.1 ГОСТ 30244-94 неповрежденной считают ту часть образца, которая не сторела и не обуглилась ни на поверхности, ни внутри. Осаждение сажи, изменение цвета образца, местные сколы, спекание, оплавление, вспучивание, усадка, коробление, изменение шероховатости поверхности не считают повреждениями.

Согласно п. 9.15 ГОСТ 30403-2012 повреждением считается обугливание, оплавление и выгорание материалов на глубину более 2 мм... Не учитывают повреждение ... в виде оплавления материалов при отсутствии видимых следов горения (обугливания).

В тоже время, фотографии, приведённые в настоящей работе, показывают, что визуально определить положение границ повреждений образцов МВ и ПИР материалов либо сложно, либо вообще невозможно. Зона изменения цвета бывает достаточно широкой, также не определено, какое изменение цвета или структуры необходимо считать обугливанием.

Из сложившейся ситуации следует, что привлечение средств объективного контроля имеет принципиальное значение, и тест на электропроводность, который применяется при расследовании пожаров [13, 14], может способствовать решению этой задачи.

Измерения электрических сопротивлений или оценки проводимости повреждённых при огневых испытаниях теплоизоляционных материалов обычно выполняется с помощью контактных и бесконтактных приборов. Факт снижения электрического сопротивления свидетельствует об участии теплоизоляционного материала в процессе распространения горения.

Даже при минимальном содержании горючих связующих веществ в образце МВ, для которого невозможно заметить изменение цвета, т.е. визуально не удаётся установить границу повреждения, её положение чётко фиксируется по изменению электропроводности (рис. 4).

Дополнительно к иллюстрациям, представленным выше (рис. 4, 5, 7), детализируем аналогичную экспертизу повреждений образцов МВ (рис. 36) и ПИР (рис. 37, 38).

В данной части настоящей работы применялся «Измеритель сопротивления изоляции UT502» совместно с многожильным контактным щупом. Диапазон измерения составлял 0,003...20 ГОм при расстоянии между электродами щупа 7 мм. Т.к. на электропроводность влияет влажность материалов, измерения проводили в нормальных условиях (при температуре 20...25⁰С и влажности воздуха 25...35%).

Для минеральной ваты средства объективного контроля электропроводности однозначно выявляют положение границы повреждений (рис. 36).

Ещё более информативным является определение электропроводности повреждённых ПИР материалов. Отсутствие электропроводности у образца, который на основании визуальной оценки кажется повреждённым, по мнению авторов, свидетельствует о самостоятельном прекращении химических реакций до образования углеродных коксовых

остатков (обугливания). Т.е. применение средств объективного контроля электропроводности позволяет выявить способность ПИР материала к самозатуханию при огневом и тепловом воздействии.

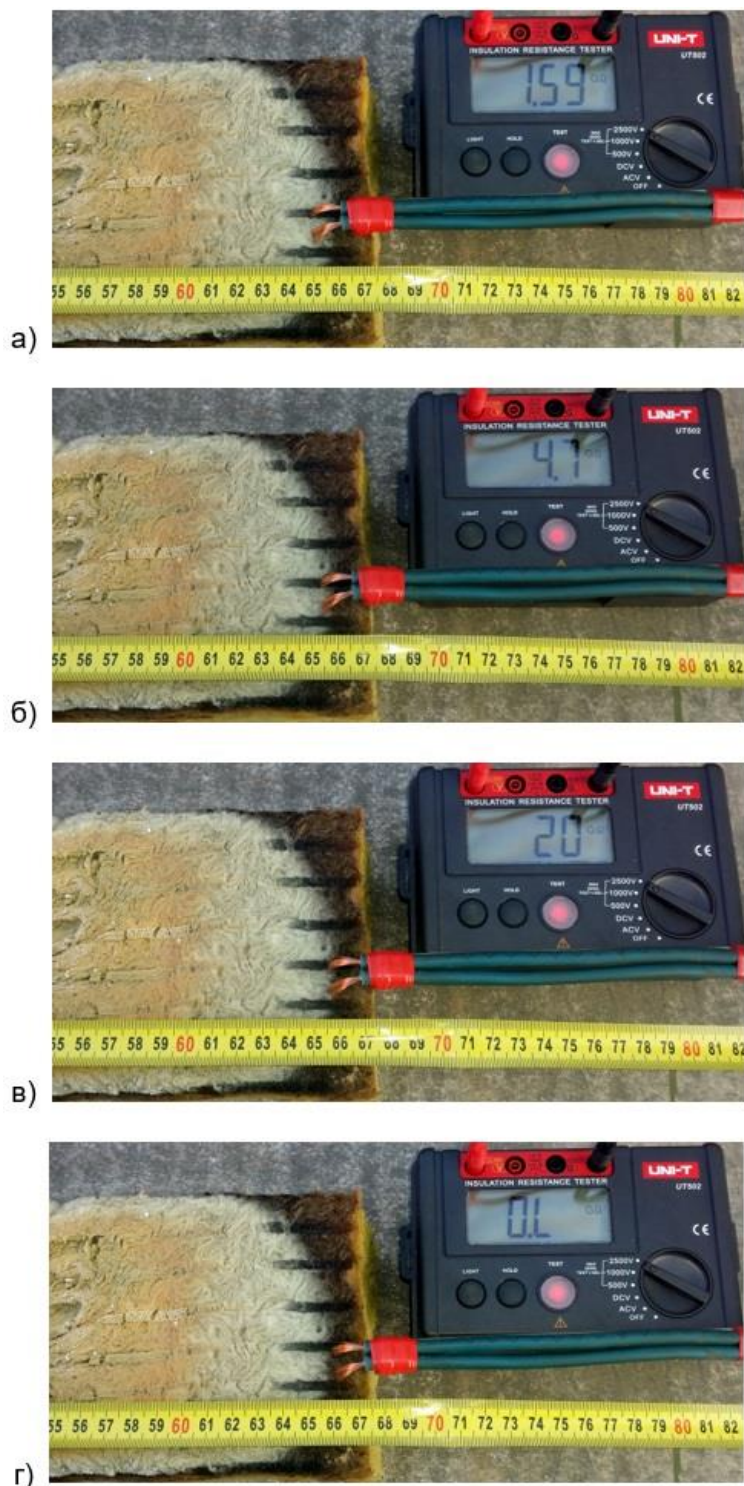


Рисунок 36. Электрические сопротивления на границе повреждённого при испытании на горючесть образца (МВ с праймером) для координат щупа слева направо: а – 650 мм, $R = 1,59$ ГОм, б – 654 мм, $R = 4,7$ ГОм, в – 657 мм, $R = 20$ ГОм, г – 660 мм, $R \rightarrow \infty$ (рис. авт.)



Рисунок 37. Повреждения при испытании на горючесть образца ПИР «Арианит» без обкладок (горючесть – Г1, плотность – 47...50 кг/м³, тип повреждения – ПИР2) и электрические сопротивления по толщине повреждённого слоя: а – 119 МОм на глубине 1 мм, б – 582 Мом на глубине 2 мм, в – более 20 ГОм на глубине 3 мм и более (рис. авт.)



Рисунок 38. Повреждения при испытании на горючесть образца ПИР (группа горючести – ГЗ, плотность – 33...35 кг/м³, тип повреждения – ПИР8) и электрические сопротивления по толщине повреждённого слоя: а – 0 МОм на глубине 1 мм, б – 111 Мом на глубине 12 мм, в – 7,4 ГОм на глубине 19 мм (рис. авт.)

Таким образом, например, установлено, что во многих случаях для материалов с типами повреждений ПИР1...ПИР4 поверхностные слои в виде корок на значительной площади не являются электропроводными, следовательно, соответствующие участки можно

не учитывать, как повреждённые. Изменение их цвета не следует квалифицировать и учитывать, как повреждения по п. 7.6.1 ГОСТ 30244-94 и как видимые следы горения (обугливания) по п. 9.15 ГОСТ 30403-2012.

Пример, зафиксированный фотографиями (рис. 37), показывает, что самозатухание химических реакций для ПИР «Арианит» имело место по толщине повреждённого материала на расстоянии 3 мм от поверхности, при этом видимую границу повреждения вообще установить невозможно, т.к. зона изменения цвета имеет толщину 4...14 мм.

Для другого материала из группы горючести Г2 и типом повреждения ПИР8 (рис. 38) электропроводным оказался слой толщиной 19 мм, что значительно ближе к кажущейся толщине повреждения.

На основании результатов обследований авторы предлагают считать повреждёнными части образцов МВ и ПИР, если их электрическое сопротивление, измеренное контактным датчиком (поверхностным щупом) при напряжении 2000В с расстоянием между электродами 7 мм, составляет менее 15 ГОм.

Выбор указанного значения обоснован тем, что в нормальных условиях электрическое сопротивление неповреждённых МВ и ПИР материалов выше 20 ГОм, а в диапазоне 10...20 ГОм электрическое сопротивление на границах повреждённых участков наиболее резко меняется при минимальном смещении датчика, т.е. соответствующая ошибка определения координат датчика будет минимальной.

В случае применения вместо мегомметра других контактных или бесконтактных приборов должна быть выполнена калибровка, позволяющая фиксировать электропроводность материалов с указанным электрическим сопротивлением (15 ГОм).

Таким образом, для получения практических результатов положение границ повреждённых участков по электропроводности будет легко определить по координатам точек, в которых электрическое сопротивление меньше выбранного критерия.

«Тест 200»

Предлагаемое испытание выполняется с целью установления причин повреждений и идентификации теплоизоляционных материалов по наблюдаемым и фиксируемым изменениям, которые влияют на пожарную опасность и огнестойкость.

«Тест 200» реализуется при тепловом (не огневом) воздействии на образцы с нагревом до 200°C.

Тепловое воздействие (выдержка в термостате) при указанной температуре для большинства ПИР материалов приводит к начальным необратимым деформациям, а также к возможным необратимым нарушениям структуры (размера и формы пор).

При низкой информативности (высокой теплостойкости, термостойкости и термоокислительной стабильности материала) тест 200°C может быть заменён на аналогичные более высокотемпературные испытания, например, при 300°C или 400°C.

Важно, чтобы тепловой тест позволял установить причины повреждений и идентифицировать образцы по деструкции в начальной фазе без риска самовоспламенения и без существенного выделения опасных продуктов. С этой точки зрения «Тест 200» наиболее безопасен, т.к. при температуре 200°C по ТГ-кривой ГОСТ Р 56721-2015 для пенополимеров потеря массы, как правило, не превышает 5...10%.

Тест рекомендуется проводить при выдержке образцов в сушильном шкафу с принудительной циркуляцией воздуха (авторы применяли сушильный шкаф ШС-80-01 СПУ с диапазоном $+50\dots+350^{\circ}\text{C}$ и рабочей температурой $200\pm 4,5^{\circ}\text{C}$).

В качестве образцов следует использовать бруски пенополимера размерами 100 x 60 мм толщиной 30...50 мм.

Перед испытанием образцы фотографируют.

Одновременно испытывают 3 образца.

Для исключения осаждения продуктов пиролиза на стенках сушильного шкафа каждый образец герметично оборачивают в 3...4 слоя алюминиевой фольгой толщиной 9...20 мкм. Это также приближает условия теста к реальным, где воздухообмен ограничен за счёт обкладок, обшивок, облицовки или штукатурки.

Выдержку образцов в прогретой печи осуществляют в течение 30 мин.

Далее в течение 30 мин. образцы охлаждают вместе с сушильным шкафом.

После указанной термообработки образцы разрезают пополам (на две части 100 x 30 мм толщиной 30...50 мм).

Изменения внешнего вида и повреждения материала в разрезе фиксируют фотографированием.

Примеры состояния материалов (образцов) до и после «Теста 200», а также установленные показатели представлены на photographиях (рис. 39, 40) и в Таблице 3.





в)

Рисунок 39. Образец газопроницаемого ПИР «Арианит» (группа горючести Г1): а, б – разрез до и после «Теста 200», в – поверхность образца после «Теста 200» (рис. авт.)



а)



б)



в)

Рисунок 40. Образец непроницаемого для газа ПИР (группа горючести Г2): а, б – разрез до и после «Теста 200», в – поверхность образца после «Теста 200» (рис. авт.)

Таблица 3

Сопоставление результатов «Теста 200» по идентификации образцов пенополимеров

Показатели	ПИР «Арианит» из группы горючести Г1 (см. рис. 8)	ПИР из группы горючести Г2 (см. рис. 9)
Цвет неповреждённого материала в свежем разрезе по RAL	RAL DESIGN 095-90-50	RAL DESIGN 090-90-30
Цвет повреждённого материала в свежем разрезе по RAL	RAL CLASSIC 1033	RAL DESIGN 070-80-60/ RAL EFFECT 270-1 цвет неоднородный
Изменения поверхности	Явно выражены, на поверхности образовалась корка толщиной до 1 мм	Слабо выражены
Необратимая деформация образца	Увеличение объёма, изменение формы	Увеличение объёма, изменение формы
Повреждения структуры	Нет	Образование щелей во всём объёме образца
Образование капель расплава и жидких продуктов пиролиза	Нет	Нет
Оценка силы запаха разреза поврежденного образца в баллах по МУ 2.1.2.1829-04	2	3

В приведённых примерах два образца пенополимеров, незначительно отличающиеся по группе горючести (Г1 и Г2), имеют существенные различия (по пяти из семи) качественным показателям.

Исследованиями различных модификаций ПИР из всех групп горючести (от Г1 до Г4) показало, что результаты «Теста 200» согласуются с результатами огневых испытаний любых масштабов (от лабораторных до натуральных). Пример такого соответствия можно показать

сравнением фотографий на рис. 20 с фотографиями на рис. 39, также сравнением фотографий на рис. 35 с фотографиями на рис. 40. Из сопоставления ясно, что огневое воздействие приводит к развитию процессов и повреждений, отмеченных для начальных состояний при тепловом воздействии от «Теста 200».

Так, начальное образование корки на поверхности (см. рис. 39 б, в) в других, более жёстких условиях (см. рис. 20), защищает материал от теплового излучения. При огневом воздействии также сохраняется начальное отсутствие повреждений структуры.

Напротив, в случае начального возникновения щелевой структуры (см. рис. 40б) разрушение непрерывной структуры пористого тела продолжается (см. рис. 35), поэтому при огневом воздействии из-за существенных деформаций возникают напряжения и трещины на поверхности материала, что позволяет кислороду воздуха проникнуть внутрь, т.е. приводит к распространению горения по толщине.

Обобщение полученных данных показывает, что на основании «Теста 200» можно не только идентифицировать материалы, но и прогнозировать характер повреждений теплоизоляционных материалов во время пожара.

«Тепловой тест»

Дальнейшее усиление информативности «Тепловых тестов» может быть выполнено при исследовании зависимостей от температуры испытаний для структуры повреждений (рис. 41) и для потери массы (рис. 42). В этом случае предлагаемые дополнительные испытания необходимо повторять по методике «Теста 200» при нескольких температурах (200, 300, ..., °С). При каждом таком тесте рекомендуется взвешивать образцы до и после теплового воздействия, а затем вычислять процент остаточной массы.

Результаты «Тепловых тестов» также как другие испытания, подтверждают, что повреждения, полученные при разных температурах, типичны по спеканию на поверхности образца и форме пор, по деформации и изменению объёма.

Важно, что для всех повреждённых ПИР материалов отсутствует электропроводность даже тех участков, цвет которых приближается к чёрному, если температуры испытаний не превышают 500...550°С.

Признаки электропроводности (обугливания) появляются при температуре 600°С. «Тест 600» подобен классическому процессу коксования, при котором в твёрдом остатке не остаётся органических веществ, обеспечивающих диэлектрические свойства. Соответственно пористая углеродная матрица вначале локально (на поверхности), а потом по всему объёму, резко теряет электрическое сопротивление.

Отличие «Тепловых тестов» от огневых испытаний заключается в отсутствии высокотемпературных источников теплового излучения, поэтому материал (тип ПИР10) благодаря меньшей кондуктивной теплопроводности получает меньшие повреждения, чем сравниваемый (тип ПИР2). На фотографиях рис. 41 видно, что цвет образцов материала (тип ПИР2) меняется быстрее. Соответствующая кривая остаточной массы материала (ПИР10) расположена выше кривой остаточной массы материала ПИР2 (рис. 42).



Рисунок 41. Сравнение образцов после «Тепловых тестов» при температурах: 200, 300, ..., 600 °С, время экспозиции - 60 мин: а – образцы без расслоений (ПИР2), б – при образовании пор в виде щелей (ПИР10) (рис. авт.)

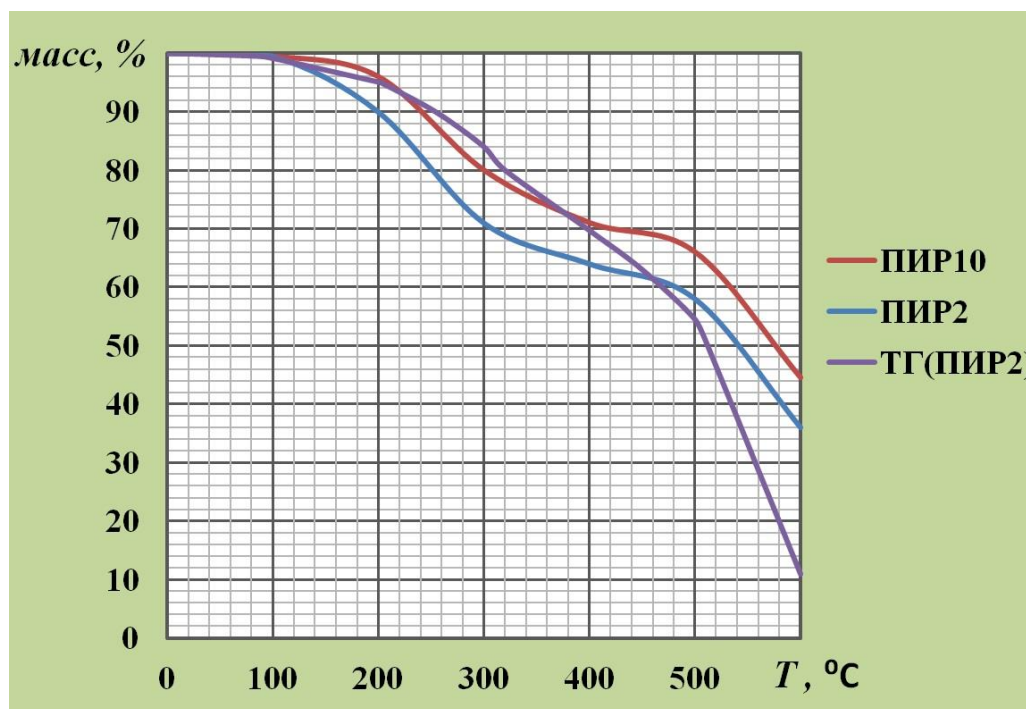


Рисунок 42. Стандартная ТГ-кривая по ГОСТ Р 56721-2015 для материала с типом повреждений ПИР2 и остаточные массы образцов после «Тепловых тестов» (время экспозиции – 60 мин) для образцов с типами повреждений ПИР2 и ПИР10 (рис. авт.)

При огневых испытаниях за счёт повреждения тепловым излучением (большей теплопроводности) наблюдается обратная картина, т.е. изменения в материале с типом повреждений ПИР10 протекало быстрее. Однако подобные вариации не меняют форму образующихся пор и состояние поверхности, т.е. на идентификацию образцов по типу повреждений эти условия практически не влияют.

Полученная при «Тепловых тестах» зависимость остаточной массы образцов от температуры отличается от стандартной ТГ-кривой, которая также приведена на рис. 42. Это объясняется тем, что при испытании на термовесах обеспечивался воздухообмен, а поверхность образца не имела обкладок. «Тепловые тесты» проводились при защите поверхности алюминиевой фольгой (в условиях, более близких к реальным).

Авторы отмечают, что для практически значимого диапазона температур «Тепловые тесты» дают более выразительные и приемлемые для идентификации зависимости.

Таким образом, все рассмотренные «Тепловые тесты» оказались пригодными для идентификации теплоизоляционных материалов по типу повреждений, в совокупности они позволяют установить механизмы изменения теплопроводности в отсутствие высокотемпературных источников, также пригодны для идентификации материалов по зависимостям остаточной массы от температуры.

7. Выводы

Результаты представленной работы могут быть использованы при разработке новых модификаций теплоизоляционных материалов с улучшенными пожарно-техническими характеристиками, при заводском контроле качества продукции и при экспертизе пожаров. В указанных областях применения рекомендуется учитывать следующее:

1. Структура повреждений МВ и ПИР материалов в основном определяется их свойствами в практически значимом (пожарном) диапазоне длительности и интенсивности огневого или теплового воздействия. Если материал не разрушается механическим способом, то структура повреждений по признакам изменения объёма, формы пор и состояния поверхности сохраняет преемственность на разных стадиях развития пожара, соответственно признакам каждого типа возникающие на начальной стадии спекания, трещины, обугливания, раковины или щели, изменения объёма, цвета и электропроводности развиваются по длине и толщине теплоизоляционных материалов.

2. Механизмы влияния свойств на пожарно-технические характеристики могут рассматриваться в соответствии с предложенной классификацией типов повреждений: двух для МВ и десяти для ПИР материалов. Такой подход обеспечивает оценку роли теплопроводности, теплопрозрачности, воздухопроницаемости, пластичности в реакции на огневое и тепловое воздействие.

3. Предлагаемые дополнительные испытания «Тепловые тесты» («Тест 200») и «Тест на электропроводность» значительно усиливают доказательную базу пожарно-структурной экспертизы и идентификации МВ и ПИР материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлин Ал.Ал. Горение полимеров и полимерные материалы пониженной горючести / Соровский образовательный журнал. 1996. №9. С. 57-63.
2. Нестеров С.В., Бакирова И.Н., Самуилов Я.Д. Термическая и термоокислительная деструкция полиуретанов: механизмы протекания, факторы влияния и основные методы повышения термической стабильности. Обзор по материалам отечественных и зарубежных публикаций // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №14. С. 23.
3. Оценка пожарной опасности теплоизоляционных материалов методами термического анализа. Методика / Н.В. Смирнов, Н.Г. Дудеров, С.Н. Булага, В.В. Булгаков, Е.Д. Михайлова, А.В. Булгаков, М.В. Лезова. М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России. 2013. С. 15.
4. Сиренко В.С., Кандырин Л.Б., Суриков П.В. Моделирование термодеструкции полиуретанов и эпоксидной смолы в инертной атмосфере // Вопросы атомной науки и техники, Серия: ядерное приборостроение. 2003. Вып. 1/20. С. 1-8.
5. Повреждение теплоизоляционных материалов тепловым излучением / В.С. Мельников, С.В. Кириллов, В.Г. Васильев, С.А. Ванин, М.В. Мельников // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности» 2016. Вып. 1/65. 10 с., <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-1/21-01-16.ttb.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана.
6. Оценка результатов огневых испытаний теплоизоляционных материалов по их электрическому сопротивлению / В.С. Мельников, С.В. Кириллов, В.Г. Васильев, С.А. Ванин, М.В. Мельников // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности» 2016. Вып. 2/66. 7 с., <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-2/06-02-16.ttb.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана.

7. В.С. Мельников, И.Р. Хасанов, С.В. Кириллов, В.Г. Васильев, С.А. Ванин, М.И. Щербаков, Р.В. Гарсков Термографирование при огневых испытаниях фрагментов зданий и строительных конструкций // Пожарная безопасность. 2015. №3. С. 83-90.
8. Мельников В.С., Васильев В.Г., Ванин С.А. Сэндвич-панель с функцией пожаротушения: пат. № RU 144710 Российская Федерация. 2014. Бюл. №24. 2 с.
9. В.С. Мельников, И.Р. Хасанов, С.В. Кириллов, В.Г. Васильев, С.А. Ванин, С.А. Потемкин, А.Е. Дроздов Стандартные трехмерные модели для испытаний фрагментов зданий на пожарную опасность и огнестойкость // Пожарная безопасность. 2015. №4. С. 116-123.
10. В.С. Мельников, И.Р. Хасанов, С.В. Кириллов, В.Г. Васильев, С.А. Ванин Модель для проведения натуральных огневых испытаний: пат. № RU 159601 Российская Федерация. 2016. Бюл. №4. 2 с.
11. Теплоизоляционные материалы сэндвич - панелей и пожарно-технические характеристики быстровозводимых зданий / В.С. Мельников, С.В. Кириллов, С.А. Потемкин, В.Г. Васильев, С.А. Ванин // конгресс "Строительная изоляция 2015". 2015. Режим доступа: http://odfevents.ru/build_insulation/, <http://www.razrabotka-stu.ru/ognevye-ispytaniya-konstrukcij-sendvich-panelei-pir/> (дата обращения).
12. Конструкции из сэндвич-панелей, фасадные системы, средства объективного контроля пожарной опасности / В.С. Мельников, В.Г. Васильев, С.В. Кириллов, С.А. Ванин, С.А. Потемкин // Первый Всероссийский форум по пожаробезопасности FIRE STOP MOSCOW 2015. Режим доступа: <http://fire-stop.moscow/congress/>, <http://www.razrabotka-stu.ru/konstrukcii-sendvich-panelej-fasadi-pozharnay-opasnost/> (дата обращения).
13. Чешко И.Д. Экспертиза пожаров. СПб.: 1997. 817 с.
14. Чешко И.Д. Технические основы расследования пожаров. Методическое пособие. СПб.: 2001. 254 с.

Melnikov Vladimir Semenovich

International fire center Ltd, Russia, Moscow
E-mail: melnikov@firecenter.ru

Kirillov Sergei Vladimirovich

International fire center Ltd, Russia, Moscow
E-mail: sv@firecenter.ru

Melnikov Mikhail Vladimirovich

International fire center Ltd, Russia, Moscow
E-mail: log54@mail.ru

Vasilev Viktor Grigorevich

Joint stock company «Ariada», Russia, Volzhsk
E-mail: ariada@mari-el.ru

Vanin Sergei Aleksandrovich

Joint stock company «TD «Ariada», Russia, Moscow
E-mail: td-ariada@yandex.ru

Potemkin Sergei Aleksandrovich

International fire center Ltd, Russia, Moscow
E-mail: potemkin@firecenter.ru

Fire-structural examination of damages of thermal insulation materials from mineral wool and isocyanurate foam

Abstract. The possibility of structural identification of insulation materials from mineral wool and isocyanurate foam during fire in the practically significant range of duration and intensity of fire and heat exposure. The analysis of the impact of thermal and fire-technical characteristics, surface effects and scale factor was carried out. The authors introduced a classification of damages: two types of materials with inorganic base and ten types for polymer foam. It is shown that the structure of damages according to the signs of change of volume, shape of pores and the surface condition of continuity at different stages of fire development, in accordance with the characteristics of each type in the length and thickness of thermal insulation materials are developing emerging at the initial stage of sintering, cracks, charring, sinks or cracks, change of volume, colour and conductivity. Examples of improved fire-technical characteristics at the expense of constructively-technological solutions with directionally selected mechanisms of damage are presented. The format of the publication on the Internet made it possible to present more photographs of a large number of research laboratory, bench and field scale, which revealed the fire hazard of insulation materials, including mineral wool based. Standard test methods for augmented thermal tests and tests on electrical conductivity, enhancing quality control and raising the reliability of the examination of the fires.

Keywords: isocyanurate foam; mineral wool; combustibility; flammability; fire hazard; fire resistance of structures; sandwich panels; insulation materials; structure of damages; classification of damage; fire examination; thermal effect; thermal conductivity; diathermy; heating test; the test for electrical conductivity

REFERENCES

1. Berlin A.I. Gorenje polimerov i polimernye materialy ponizhennoy goryuchesti / Sorovskiy obrazovatel'nyy zhurnal. 1996. №9. S. 57-63.
2. Nesterov S.V., Bakirova I.N., Samuilov Ya.D. Termicheskaya i termookislitel'naya destruktsiya poliuretanov: mekhanizmy protekaniya, faktory vliyaniya i osnovnye metody povysheniya termicheskoy stabil'nosti. Obzor po materialam otechestvennykh i zarubezhnykh publikatsiy // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2011. №14. S. 23.
3. Otsenka pozharnoy opasnosti teploizolyatsionnykh materialov metodami termicheskogo analiza. Metodika / N.V. Smirnov, N.G. Duderov, S.N. Bulaga, V.V. Bulgakov, E.D. Mikhaylova, A.V. Bulgakov, M.V. Lezova. M.: FGBU VNIPO MChS Rossii. 2013. S. 15.
4. Sirenko V.S., Kandyrin L.B., Surikov P.V. Modelirovanie termodestruktsii poliuretanov i epoksidnoy smoly v inertnoy atmosfere // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki, Seriya: yadernoe priborostroenie. 2003. Vyp. 1/20. S. 1-8.
5. Povrezhdenie teploizolyatsionnykh materialov teplovym izlucheniem / V.S. Mel'nikov, S.V. Kirillov, V.G. Vasil'ev, S.A. Vanin, M.V. Mel'nikov // Internet-zhurnal «Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti» 2016. Vyp. 1/65. 10 s., <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-1/21-01-16.ttb.pdf> (dostup svobodnyy). Zagl. s ekrana.
6. Otsenka rezul'tatov ognevykh ispytaniy teploizolyatsionnykh materialov po ikh elektricheskomu soprotivleniyu / V.S. Mel'nikov, S.V. Kirillov, V.G. Vasil'ev, S.A. Vanin, M.V. Mel'nikov // Internet-zhurnal «Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti» 2016. Vyp. 2/66. 7 s., <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-2/06-02-16.ttb.pdf> (dostup svobodnyy). Zagl. s ekrana.
7. V.S. Mel'nikov, I.R. Khasanov, S.V. Kirillov, V.G. Vasil'ev, S.A. Vanin, M.I. Shcherbakov, R.V. Garskov Termografirovaniye pri ognevykh ispytaniyakh fragmentov zdaniy i stroitel'nykh konstruktsiy // Pozharnaya bezopasnost'. 2015. №3. S. 83-90.
8. Mel'nikov V.S., Vasil'ev V.G., Vanin S.A. Sendvich-panel' s funktsiey pozharotusheniya: pat. № RU 144710 Rossiyskaya Federatsiya. 2014. Byul. №24. 2 s.
9. V.S. Mel'nikov, I.R. Khasanov, S.V. Kirillov, V.G. Vasil'ev, S.A. Vanin, S.A. Potemkin, A.E. Drozdov Standartnye trekhmernye modeli dlya ispytaniy fragmentov zdaniy na pozharnuyu opasnost' i ognestoykost' // Pozharnaya bezopasnost'. 2015. №4. S. 116-123.
10. V.S. Mel'nikov, I.R. Khasanov, S.V. Kirillov, V.G. Vasil'ev, S.A. Vanin Model' dlya provedeniya naturnykh ognevykh ispytaniy: pat. № RU 159601 Rossiyskaya Federatsiya. 2016. Byul. №4. 2 s.
11. Teploizolyatsionnye materialy sendvich - paneley i pozharno-tekhnicheskie kharakteristiki bystrovozvodimykh zdaniy / V.S. Mel'nikov, S.V. Kirillov, S.A. Potemkin, V.G. Vasil'ev, S.A. Vanin // kongress "Stroitel'naya izolyatsiya 2015". 2015. Rezhim dostupa: http://odfevents.ru/build_insulation/, <http://www.razrabotka-stu.ru/ognevye-ispytaniya-konstrukcij-sendvich-paneley-pir/> (data obrashcheniya).
12. Konstruktsii iz sendvich-paneley, fasadnye sistemy, sredstva ob"ektivnogo kontrolya pozharnoy opasnosti / V.S. Mel'nikov, V.G. Vasil'ev, S.V. Kirillov, S.A. Vanin, S.A.

Potemkin // Pervyy Vserossiyskiy forum po pozharobezopasnosti FIRE STOP MOSCOW 2015. Rezhim dostupa: <http://fire-stop.moscow/congress/>, <http://www.razrabotka-stu.ru/konstrukcii-sendvich-panelej-fasadi-pozharnay-opasnost/> (data obrashcheniya).

13. Cheshko I.D. Ekspertiza pozharov. SPb.: 1997. 817 s.
14. Cheshko I.D. Tekhnicheskie osnovy rassledovaniya pozharov. Metodicheskoe posobie. SPb.: 2001. 254 s.