

В.С. Мельников¹, С.В. Кириллов¹, В.Г. Васильев², С.А. Ванин², М.В. Мельников¹
(¹ООО "Международный противопожарный центр",
²ЗАО "Ариада", e-mail: melnikov@firecenter.ru)

ПОВРЕЖДЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОМЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Экспериментально установлена теплопрозрачность минеральной ваты и двух модификаций пенополиизоциануратов. Проанализированы повреждения материалов в условиях пожара для фазы теплового воздействия.

Ключевые слова: ИК-прозрачность, термографирование, пенополиизоцианурат, минеральная вата, пожарная опасность.

V.S. Melnikov, S.V. Kirillov, V.G. Vasil'ev, S.A. Vanin, M.B. Melnikov
**DAMAGING OF HEAT INSULATING MATERIALS
BY THERMAL RADIATION**

Diathermy of mineral wool and two modifications of polyisocyanurate (PIR) was experimentally established. Damages of materials under fire conditions for heat affecting phase were analyzed.

Key words: IR-transparency, thermography, polyisocyanurate, mineral wool, fire hazard.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 13 декабря 2015 г.

Горючесть многих теплоизоляционных материалов существенно ограничивает их применение. В проведённом авторами исследовании анализируются теплоизоляционные материалы из **минеральной ваты (МВ)** и **пенополиизоцианурата (ПИР)**, поскольку они занимают видную часть потребления строительной отрасли.

Для современных строительных конструкций, содержащих негорючую и слабогорючую облицовку или обшивку, штукатурку и т.д., начальная и частично развитая фазы пожара сопровождаются только тепловым воздействием на внутренние слои. До момента потери целостности в конструкциях из сэндвич-панелей и в многослойных системах, например, в фасадных и кровельных, при пожаре обеспечивается защита теплоизоляционных материалов от прямого огневого воздействия, также существенно ограничивается доступ кислорода воздуха.

Отсутствие развитого горения и распространения горения внутри строительных конструкций с теплоизоляцией ПИР и МВ при огневых испытаниях разного масштаба (лабораторных, стендовых, натуральных) становится очевидным, если в качестве средств объективного контроля применяются термографы [1, 2]. В случае проявления тепломассообменных процессов, сопровождающих развитое горение внутри конструкций, на их поверхности неизбежно возникают

температурные аномалии, которые термографами не регистрируются, то есть развитого горения нет до момента потери целостности внешних слоёв (при условии, что конструкции изготовлены и смонтированы с надлежащим контролем качества).

Авторы исследовали состояние многослойных конструкций при пожаре и устанавливали причины повреждений теплоизоляционных материалов в условиях теплового воздействия.

Эти условия имеют место именно тогда, когда при пожаре строительные конструкции продолжают выполнять свои функции. Процессы за пределами огнестойкости конструкций не исследовались.

В табл. 1 представлены материалы и характеристики, которые учитывались при оценке результатов испытаний.

Таблица 1

Теплотехнические и пожарно-технические характеристики

Характеристики	Теплоизоляционные материалы			
	Минеральная вата (МВ) [5]	ПИР Арианит с обкладками [6]	ПИР Арианит [7]	ППИ [8]
Оценка горючести по методу I [3]	НГ	горючие строительные материалы		
Потеря массы образца по методу I [3]	8...9	82...92	82...92	89...95
Содержание органических веществ по массе, %	≤ 4,5*			
Определение группы горючести по методу II [3]	Г1	Г1	Г1	Г2
Определение группы воспламеняемости [4]	В1	В1	В2	В2
Коэффициенты теплопроводности: $\lambda_0, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{°K})$ $\lambda_A, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{°K})$ $\lambda_B, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{°K})$	0,035 (λ_{10})* 0,037 (λ_{25})* 0,038* 0,040*	0,030** 0,030** 0,031**	0,026 (λ_{20})** 0,024 (λ_{25})** 0,026** 0,027**	0,022
Плотность, $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	90±10 %*	47...50	47...50	40...45
Водопоглощение, $\text{кг}/\text{м}^2$	1,0*	0	0,04...0,08**	0
Паропроницаемость, $\mu, \text{мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$	≥ 0,3*	0	0	0

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)

Чисто тепловое воздействие оказывается при испытании строительных материалов на воспламеняемость по ГОСТ 30402-96 [4], когда поверхностная плотность теплового потока меньше критического значения и нет устойчивого пламенного горения материалов. Типичный вид образцов после такого воздействия показан на рис. 1.

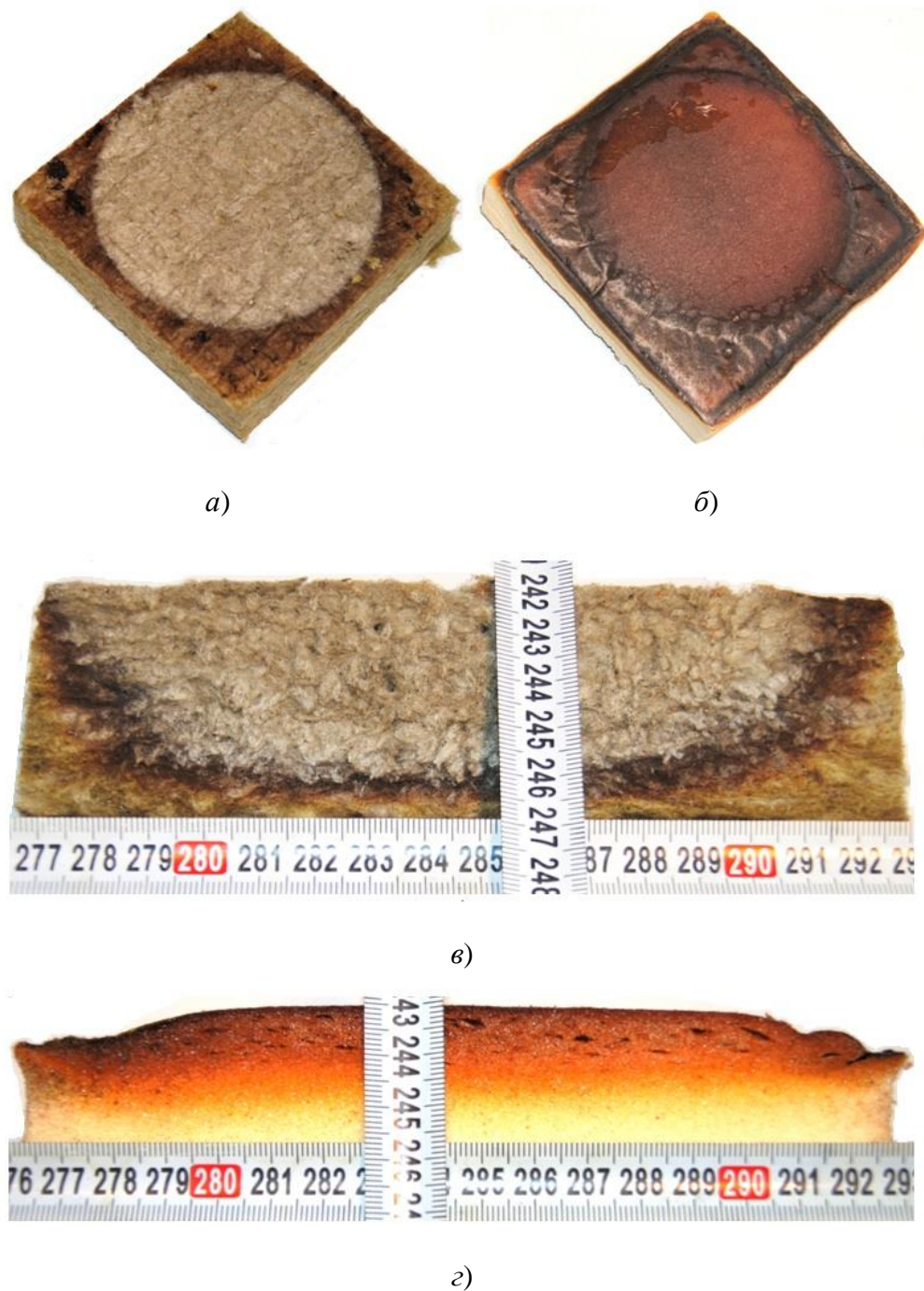


Рис. 1. Образцы теплоизоляционных материалов после испытания на воспламеняемость при плотности теплового потока 40 кВт/м^2 и выдержке 10 мин. (воспламенение не зафиксировано):
а, в – МВ [5]; б, з – ПИР [6] (фольга после испытания удалена);
а, б – общий вид (уменьшено); в, з – вид в разрезе

На представленных фотографиях хорошо заметны изменения исходных структур и цвета материалов, которые соответствуют направлению теплового излучения от радиационной панели (сверху вниз).

Зона изменений у минеральной ваты практически вдвое больше, чем у пенополиизоцианурата. Это согласуется с известным различием теплопроводностей: $\lambda_{MB} = 0,035 \dots 0,040, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ и $\lambda_{ПИР} = 0,022 \dots 0,031 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$.

При реальном пожаре, натуральных или стендовых испытаниях до момента потери целостности конструкций наблюдаемые изменения отличаются так же, как и в приведённых лабораторных испытаниях на воспламеняемость. В равных условиях, когда совпадают время и плотность теплового потока, изменения структур и цвета минеральной ваты заметно больше, чем у ПИР (рис. 2).

Локализация наибольших изменений ПИР всегда имеет место у обогреваемой поверхности (рис. 1а и 2б). Такая же локализация для минеральной ваты наблюдается, если на её поверхность нанесён слой праймера (клея), обеспечивающего соединение с обшивкой (рис. 2а).

В исходном состоянии, то есть при низком содержании органических связующих веществ (4,5 % по табл. 1), у поверхности минеральной ваты локализации нет и имеют место однородные изменения по толщине (рис. 1в).

Во всех случаях для минеральной ваты заметна локализация изменений цвета (тёмно-коричневая прослойка) внутри материала на границе между изменённой частью и неповреждённым слоем (рис. 1в, 2а).

Для ПИР внутренней границы нет, переход к неповреждённому слою формируется плавно (рис. 1а, 2б).

Представленным образом в широком диапазоне условий при пожаре проявляются реакции деструкции и сшивки на молекулярном уровне. Возможные физико-химические процессы, сопровождающие эти реакции, показаны в обзоре [9], в котором к действию внешнего теплового потока почти в каждой из возможных реакций добавлен внутренний тепловой эффект (поглощение или выделение тепла).

Важно, что в случае минеральной ваты даже при внешнем конструктивном ограничении воздухообмена внутри самого материала всегда достаточно кислорода воздуха для поддержания реакций окисления и соответствующего выделения тепла. Газопроницаемость (паропроницаемость, табл. 1) этого материала также способствует распространению нагретых продуктов реакций и локальному воздухообмену.

Газонепроницаемый теплоизоляционный материал ПИР отличается в основном поверхностным окислением и поверхностным дополнительным тепловыделением.

На указанные тепломассообменные процессы естественно накладывается увеличение теплопроводности материалов с ростом температуры. Так, в условиях пожара для воздуха, заполняющего минеральную вату, теплопроводность может увеличиваться от 0,025 до 0,070 $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$.



а)



б)

Рис. 2. Изменения цвета и структуры теплоизоляционных материалов при испытании строительных конструкций из сэндвич-панелей на огнестойкость по ГОСТ Р 56076-2014 [2]:
а – МВ; б – ППИ, обшивка с обогреваемой стороны снята, необогреваемые стороны образцов и неповреждённые слои находятся снизу фотографий

Понимание изложенных механизмов суперпозиции внешнего и внутренних тепловых потоков стало причиной постановки специальных экспериментов (рис. 3).

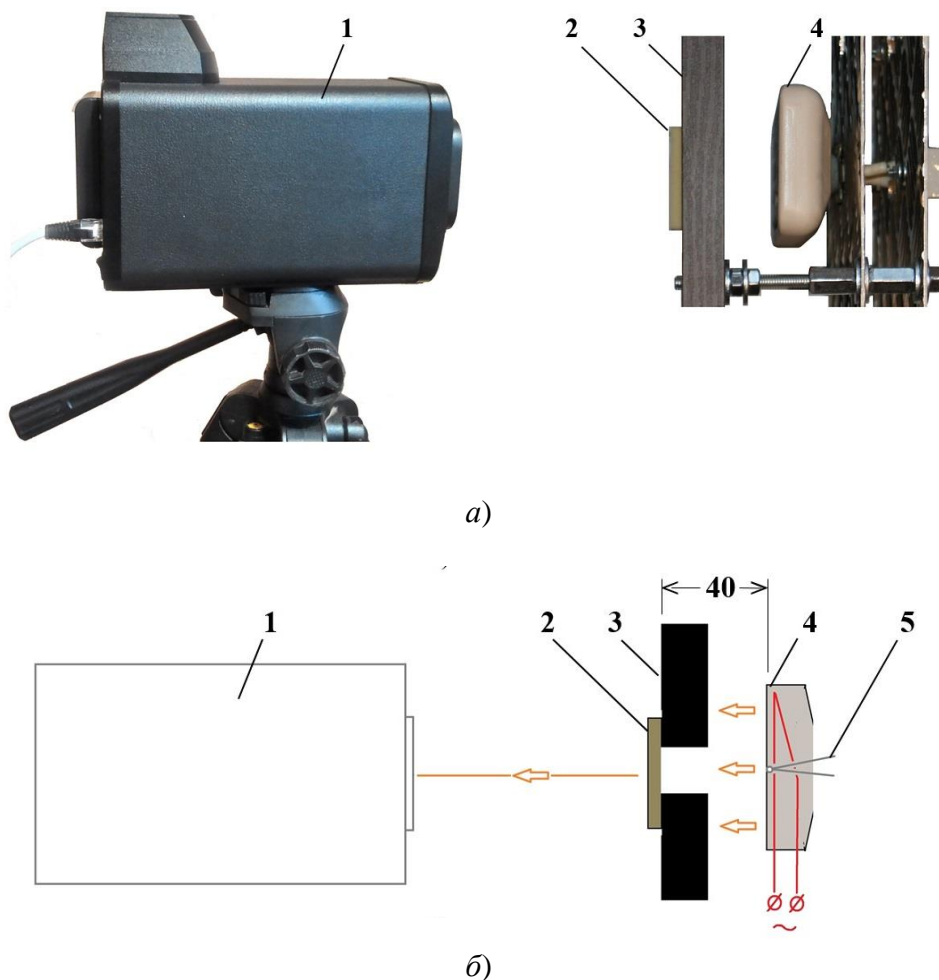


Рис. 3. Оборудование (а) и схема (б) термографирования:
 1 – термограф ИРТИС 2000 [1]; 2 – образец теплоизоляционного материала;
 3 – мишень толщиной 16 мм с отверстием диаметром 16 мм;
 4 – калиброванный источник теплового излучения;
 5 – термопара регулятора температуры

В данных экспериментах термографом (1) фиксировали тепловой поток, который исходил от образца (2). Образцы толщиной $s = 2,5 \dots 15$ мм размещали на отверстии мишени (3), которую кратковременно (на 3 сек) устанавливали для экспозиции тепловым потоком источника (4). Мощность теплового излучения поддерживали на уровне $36,4 \pm 0,4$ кВт/м² с использованием регулятора температуры по показаниям термопары (5).

Предварительно было установлено, что время прогрева до начала изменений структуры и цвета образцов составляет не менее 30 с, то есть за время экспозиции термограф фиксировал только прошедшее через образцы тепловое излучение (спектральный ИК-диапазон – 3...5 мкм). Благодаря отсутствию инерционности бесконтактных измерений наблюдали ИК-прозрачность (теплопрозрачность) материалов в неповреждённом состоянии (рис. 4).

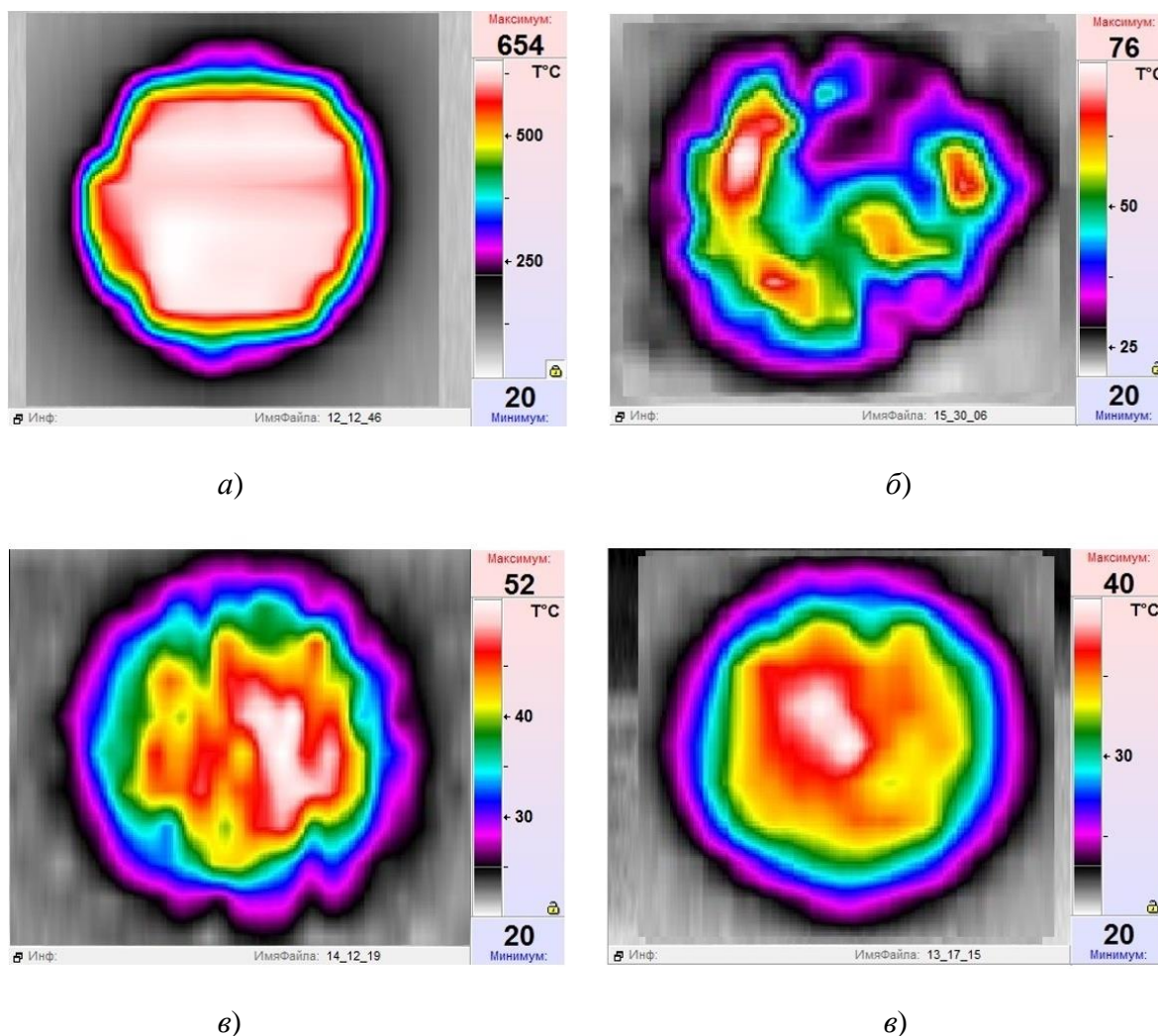


Рис. 4. Примеры термограмм:

а – мишень без образца, *б* – МВ [5], $s = 4,5$ мм, $t_{cp} = 48$ °C;
в – ППИ [8], $s = 5,4$ мм, $t_{cp} = 44$ °C; *г* – ПИР Арианит [7], $s = 4,5$ мм, $t_{cp} = 35$ °C

На представленных термограммах в поле зрения максимальная температура источника составляет 654 °C (рис. 4а), а температуры образцов зависят от выбора материала и его толщины.

Начальная температура образцов составляла 19...20 °C, поэтому по результатам наблюдений следует отметить, что при определённой толщине все исследованные материалы пропускали часть теплового излучения от источника. Кроме того, исследованные материалы для теплового потока являются неоднородными (рис. 4б, 4г), а минеральная вата не является сплошной средой (рис. 4б).

Результаты определения температур по термограммам (максимальных $t_{\text{макс}}$ и средних $t_{\text{ср}}$) представлены на рис. 5 в зависимости от толщины материалов s .

Точками на графиках (рис. 5а-5в) показаны экспериментальные значения, линиями тренда – расчётные величины с достоверностью аппроксимации – R^2 . Для каждого материала там же приведены соответствующие расчётные формулы.

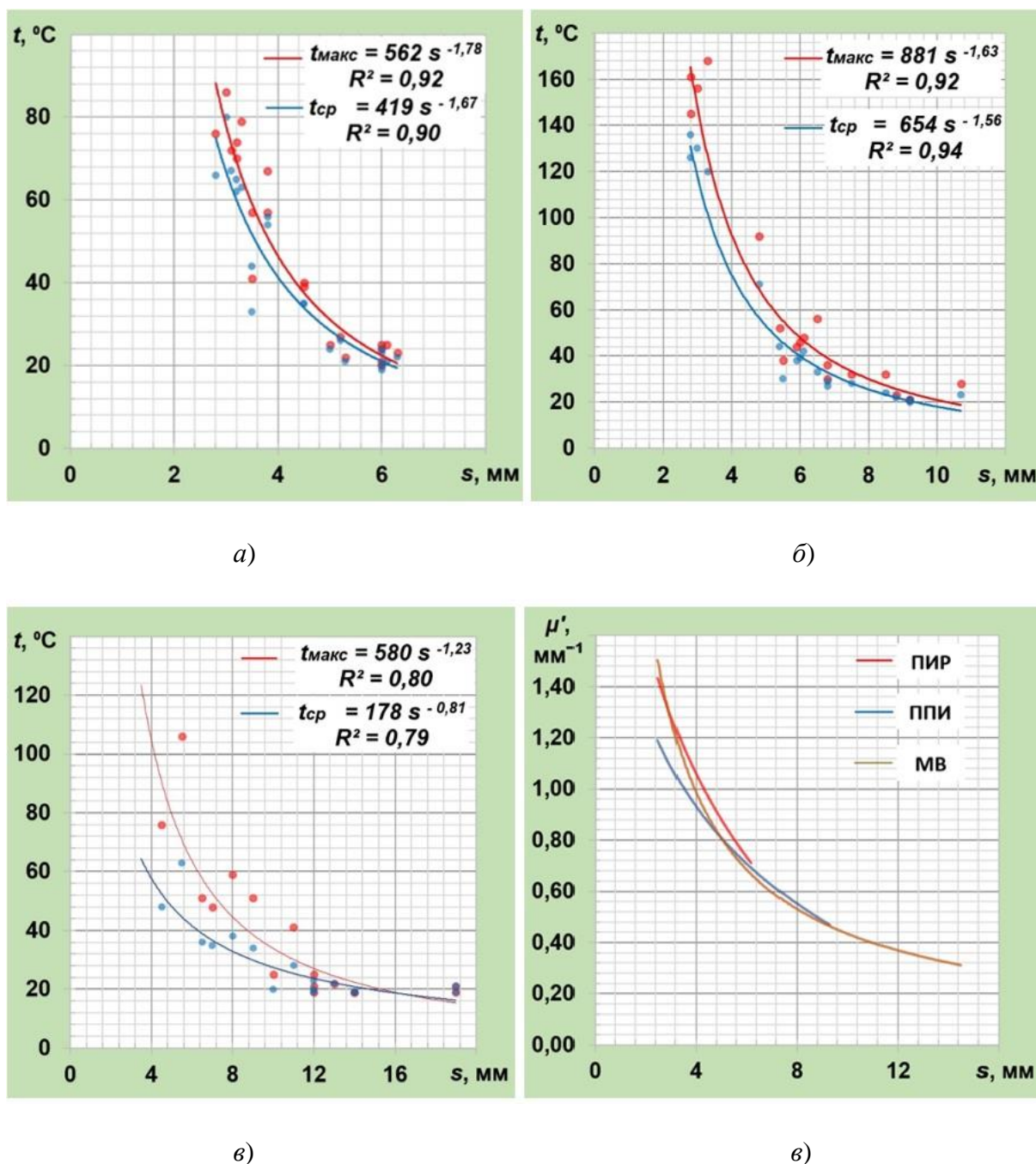


Рис. 5. Температуры образцов (максимальные – $t_{\text{макс}}$ и средние – $t_{\text{ср}}$) в поле зрения отверстия мишени и натуральные показатели ослабления μ' для разных толщин материалов s : а – ПИР Арианит [7]; б – ППИ [8]; в – МВ [5]; г – μ' для ПИР, ППИ и МВ

Графики для показателей ослабления на рис. 5г получены расчётом по известному соотношению:

$$\mu' = s^{-1} \ln(\Phi_0/\Phi_s),$$

где $\Phi_0 = 36400 \text{ Вт/м}^2$ – поток излучения на входе образца;

Φ_s – поток излучения на выходе образца, Вт/м^2 .

$$\Phi_s = 5,67 (T/100)^4,$$

где $T = t_{cp} + 273,15$, °С, а значения средних температур t_{cp} рассчитаны по формулам для линий тренда на рис. 5а-5в.

Представленные зависимости показывают, что температуры на выходе образцов были равны начальным (19...20 °С) при следующих толщинах материалов:

$$s \geq 6,2 \text{ мм} \text{ – для ПИР Арианит [7];}$$

$$s \geq 9,3 \text{ мм} \text{ – для ППИ [8];}$$

$$s \geq 14,5 \text{ мм} \text{ – для минеральной ваты [5].}$$

Следовательно, минеральная вата относительно ПИР не только имела более высокую теплопроводность, но также в большей мере пропускала тепловое излучение от высокотемпературных источников.

Можно утверждать, что тепловое излучение для выбранных образцов теплоизоляционных материалов является объёмным источником тепла, который существенно увеличивает температуру на расстоянии до 3 мм от поверхности, а также подготавливает фронт продвижения тепломассообменных процессов на расстоянии до 7...15 мм. Здесь растут коэффициенты теплопроводности материалов, а для газопроницаемой минеральной ваты усиливается и локальный воздухообмен.

Термографирование показало и то, что после начального ступенчатого изменения температуры дальнейший рост температур на необогреваемой поверхности тонких образцов происходит заметно быстрее, чем этого следовало ожидать при передаче тепла за счёт теплопроводности.

Очевидно, что установленная теплопрозрачность материалов будет аналогично способствовать распространению фронта тепломассообменных процессов и от вторичных источников тепла, например, от зон интенсивного окисления или от прогретых зон и элементов конструкций.

Возвращаясь к качественному анализу изображений на рис. 1, 2, можно сказать, что переходные структуры и цвета от повреждённого слоя материала до неповреждённого формируются, в том числе, из-за действия теплового излучения.

Нагрев материала по толщине за счёт теплового излучения происходит одновременно, для ПИР это может быть причиной образования одинаковых по размеру щелей и раковин на различном расстоянии от поверхности (рис. 1г и рис. 2б).

Степень черноты (излучательная способность) металлических обшивок (обкладок) теплоизоляционного материала при равной температуре будет определять толщину объёмного нагрева (замечено, что за алюминиевой фольгой повреждения ПИР оказывались меньше, чем за оцинкованной стальной пластиной).

Выводы

1. Тепловое излучение внутри многослойных строительных конструкций и повреждение теплоизоляционных материалов при пожаре являются взаимосвязанными процессами, изучение которых необходимо для адекватного моделирования динамики опасных факторов пожара.

2. Введение в сырьевые композиции добавок, снижающих теплопрозрачность модификаций пенополиизоцианурата, представляет практический интерес для улучшения пожарно-технических характеристик теплоизоляционных материалов.

3. Поскольку теплоизоляционные материалы чувствительны к тепловому излучению, перспективными можно считать конструктивные решения, ослабляющие тепловое излучение от облицовок, обшивок, штукатурок внутрь многослойных строительных конструкций за счёт снижения температуры и (или) степени черноты внутренних поверхностей.

Литература

1. *Мельников В.С., Хасанов И.Р., Кириллов С.В., Васильев В.Г., Ванин С.А., Щербатов М.И., Гарсков Р.В.* Термографирование при огневых испытаниях фрагментов зданий и строительных конструкций // Пожарная безопасность. 2015. № 3. С. 83-90.

2. *ГОСТ Р 56076-2014.* Конструкции строительные. Конструкции из панелей с металлическими обшивками. Методы испытаний на огнестойкость и пожарную опасность.

3. *ГОСТ 30244-94.* Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть.

4. *ГОСТ 30402-96.* Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость.

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 PIR) 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 PIR) 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. *Берлин Ал.Ал.* Горение полимеров и полимерные материалы пониженной горючести // Соровский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 57-63.