

## СВОЙСТВА ГОРЮЧЕГО ЭКСТРУДИРОВАННОГО ПЕНОПОЛИСТИРОЛА В УСЛОВИЯХ ДОПИРОЛИЗНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА

Кудряшов В.А., Ивлев Ю.П., Дробыш А.С., Ботян С.С.

*Цель.* На основе экспериментальных данных и теоретических исследований оценить свойства горючих утеплителей из плит пенополистирольных экструзионных в условиях допиролизного высокотемпературного нагрева и их влияние на огнестойкость и класс пожарной опасности конструкций бесчердачных покрытий с профилированными листами.

*Методы.* Для подробного изучения поведения горючего экструдированного пенополистирола в условиях воздействия повышенных температур проводили испытания модельных образцов на установках по оценке воспламеняемости и определению температуры вспышки в открытом тигле ТВО-ЛАБ-01 с расширенной базой измерительного оборудования.

*Результаты.* Результаты модельных испытаний свидетельствуют о том, что для образцов различных производителей характерны идентичные термические повреждения, приобретаемые после повышения температуры поверхности выше 100 °С, с образованием скопления (сгустков) квазирасплавленного (поврежденного) материала на обогреваемой поверхности с температурой около 120...140 °С. При приближении температуры к 160 °С повреждения более выражено соответствуют расплаву. Если мощности теплового потока недостаточно для образования расплава по всему объему материала, его усадка происходит до понижения температур вдоль оси теплового потока до температуры расплава (120...140 °С).

Для оценки термических повреждений в условиях крупномасштабных испытаний целесообразно сопоставлять повреждения экструдированного полистирола с таблицей 2 настоящей статьи, с учетом данных температурных измерений. Факт горения экструдированного пенополистирола может быть подтвержден только наличием вспененного остатка, свидетельствующего о кипении расплава.

Для моделирования термического повреждения экструдированного пенополистирола в виде термической усадки целесообразно использовать критическую температуру, не превышающую 100 °С.

*Область применения исследований.* Результаты исследований могут быть применены при проектировании и строительстве бесчердачных покрытий на основе профилированных листов с применением комбинированного подхода в части набора необходимой величины горючих и негорючих утеплителей, горючего кровельного покрытия и пароизоляции.

*Ключевые слова:* воспламеняемость, температура вспышки, модельные испытания, пенополистирол экструзионный, профилированный лист, повреждение материала, пожарная опасность.

(Поступила в редакцию 29 марта 2024 г.)

### Введение

Применение современных технологий проектирования и строительства зданий и сооружений различного функционального назначения позволяет сократить сроки строительства, повысить качество возводимых объектов, минимизировать экономические издержки<sup>1</sup>. В настоящее время легкие металлические конструкции широко применяются при строительстве крупных зданий и сооружений. Использование легких металлических конструкций

<sup>1</sup> О приоритетных направлениях развития строительной отрасли [Электронный ресурс]: директива Президента Республики Беларусь, 4 марта 2019 г., № 8 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://www.pravo.by/document/?guid=3871&p0=P01900008>. – Дата доступа: 20.01.2021.

обусловлено значительным снижением материалоемкости, трудоемкости, а соответственно, сокращением сроков и стоимости строительства таких объектов. Одним из способов снижения удельного веса в объеме зданий и сооружений является облегчение бесчердачных покрытий на основе профилированных листов в части замены ряда слоев утеплителя из минеральной ваты на плиты пенополистирольные экструзионные.

Следует отметить, что последние годы на рынке теплоизоляции, в том числе в сегменте минеральной ваты, сформировался повышенный спрос. В профессиональном строительстве потребление каменной ваты за пять месяцев 2023 г. выросло на 12 %, причем тенденция сохраняется<sup>2</sup>. Данный аспект подталкивает к поиску альтернативных решений в части замены в кровлях минеральной ваты на альтернативные материалы, которые по своим свойствам не уступают заменяемым.

Замена части слоев минеральной ваты на плиты пенополистирольные экструзионные в составе покрытий на основе профилированных листов на первый взгляд выглядит весьма заманчиво, но при этом появляется дополнительная опасность в части поведения таких конструкций в условиях пожара. Если учесть, что в таких конструкциях, как правило, применяют рулонные ковры из горючих материалов и пароизоляционные пленки, то суммарный объем горючих материалов может оказать существенное влияние на огнестойкость покрытия и площадь пожара. Общий прирост температуры в условиях пожара с учетом вклада таких горючих материалов может повлиять на сохранение общей устойчивости ограждающих и несущих элементов зданий, внести дополнительные риски в обеспечение безопасной эвакуации людей и создание условий для тушения пожара пожарными аварийно-спасательными подразделениями.

Ряд исследований по определению пожарной опасности экструзионного пенополистирола однозначно констатирует, что при воздействии пламени горелки на его поверхности образуется расплав и горящие капли, продолжительность которых наблюдается 10–15 с на первой-второй минутах эксперимента. При этом остальные параметры горючести соответствуют значениям, установленным для группы Г1 (вследствие высокой вязкотекучести материала под воздействием пламени), наличие горящих капель расплава однозначно относит такой материал к группе Г4 (сильногорючие материалы) по ГОСТ 30244<sup>3</sup> [1]. Также при испытании пенополистирольных плит ПСБ, ПСБ-С в ряде случаев не наблюдалось появления горящих капель расплава, однако по остальным параметрам эти материалы относятся к группе горючести Г3 или Г4<sup>4</sup> [2].

Оценка пожарной опасности строительных конструкций в Республике Беларусь определяется путем проведения натурных испытаний по соответствующей методике и заключается в определении размеров повреждения строительной конструкции за пределами зоны нагрева (в контрольной зоне в результате огневого воздействия) в течение времени, определяемого требованиями к этой конструкции по огнестойкости с целью ее классификации по пожарной опасности<sup>5</sup>.

При присвоении класса пожарной опасности конструкции учитываются следующие факторы: наличие пламенного горения газов или расплавов, выделяющихся из конструкции в результате термического разложения составляющих ее материалов; размеры повреждения конструкции и составляющих ее материалов, возникшего при испытании конструкции, вследствие их горения или термического разложения; пожарно-технические характеристики

---

<sup>2</sup> В России резко вырос спрос на теплоизоляцию [Электронный ресурс] // Корпорация ТЕХНОНИКОЛЬ. – Режим доступа: <https://www.tn.ru/about/press/news/v-rossii-rezko-vyros-spros-na-teploizolyatsiyu/>. – Дата доступа: 12.04.2024.

<sup>3</sup> ГОСТ 30244. Межгосударственный стандарт. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть. – Введ. 01.01.97. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 1996. – 28 с.

<sup>4</sup> См. сноску 3.

<sup>5</sup> СТБ 1961-2009. Государственный стандарт Республики Беларусь. Конструкции строительные. Методы определения пожарной опасности. – Введ. 01.01.10. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2009. – 26 с.

составляющих конструкцию материалов, поврежденных в ходе испытаний<sup>6</sup>. При этом в качестве пожарно-технических характеристик материалов, используемых при изготовлении строительных конструкций, принимают горючесть – по ГОСТ 30244, воспламеняемость – по ГОСТ 30402<sup>7</sup>, дымообразующую способность – по ГОСТ 12.1.044<sup>8</sup>. За критерии оценки по повреждению принимаются обугливание, оплавление и выгорание материалов, из которых изготовлена конструкция, на глубину более 2 мм.

Как показывает практика, при испытаниях по определению класса пожарной опасности конструкций покрытий на основе профилированных листов с применением в качестве одного из слоев утепления горючего экструдированного пенополистирола, характер его повреждения после удаления источника огневого воздействия является не совсем однозначным, при этом температура воспламенения пенополистирола колеблется от 210 до 440 °С в зависимости от используемых добавок [3]. Для поврежденного материала характерны следующие особенности: изменение цвета (потемнение), появление стеклования, спекание. Возникает закономерный вопрос: как указанные выше особенности могут быть соотнесены с повреждениями, описанными в методе определения пожарной опасности<sup>9</sup>? Для ответа на него сначала необходимо разобраться с процессами, протекающими в структуре экструдированного пенополистирола при его высокотемпературном воздействии, и насколько на первый взгляд очевидные структурные изменения попадают под критерии повреждения.

### Основная часть

**Модельные испытания экструдированного пенополистирола на установке по оценке воспламеняемости.** Для подробного изучения поведения экструдированного пенополистирола в условиях воздействия повышенных температур испытания проводили для модельных образцов на установках по оценке воспламеняемости по ГОСТ 30402 и определению температуры вспышки в открытом тигле ТВО-ЛАБ-01 по ГОСТ 4333<sup>10</sup>. Основная цель испытаний – уточнение предельных значений температур, при которых для образцов наблюдаются процессы стеклования (теплового сокращения), плавления и кипения (вспышки).

В связи со сложностью физико-химических процессов, происходящих при нагреве и пиролизе экструдированного пенополистирола, для более подробного анализа его повреждений при высокотемпературном нагреве важно рассмотреть следующие концептуальные понятия, характеризующие процессы его разложения/горения:

*Пиролиз* – необратимый термический процесс разложения веществ без окислителя<sup>11</sup>.

*Термическая деструкция (термодеструкция)* – совокупность разрушительных химических процессов в пластмассе, протекающих при повышенной температуре<sup>12</sup> [4].

*Горение* – экзотермическая реакция материала с окислителем, сопровождающаяся выделением значительного количества теплоты и обычно ярким свечением (пламенем) и (или) образованием дыма [4].

<sup>6</sup> См. сноску 5.

<sup>7</sup> ГОСТ 30402-96. Межгосударственный стандарт. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость. – Введ. 30.03.97. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 1997. – 27 с.

<sup>8</sup> ГОСТ 12.1.044. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – Введ. 17.12.92. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 1992. – 104 с.

<sup>9</sup> См. сноску 5.

<sup>10</sup> ГОСТ 4333-2014. Межгосударственный стандарт. Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле. – Введ. 01.07.16. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 2017. – 22 с.

<sup>11</sup> СТ СЭВ 383-87. Пожарная безопасность в строительстве. Термины и определения. – Введ. 01.01.88. – Магдебург: Постоянная Комиссия по сотрудничеству в области стандартизации, 1987. – 8 с.

<sup>12</sup> См. сноску 11.

*Обугливание* – образование карбонизированного остатка в результате пиролиза или неполного сгорания<sup>13</sup> [5].

*Термическое расширение* – изменение размеров или объема образца, вызванное изменением его температуры<sup>14</sup> [4].

*Температура стеклования полимера* – температура, при которой аморфный полимер изменяет свои свойства в результате фазового перехода из стеклообразного состояния в высокоэластическое или вязкотекучее состояние. Обычно за температуру стеклования принимают примерную середину температурного интервала, в котором происходит переход стеклования<sup>15</sup> [4].

*Температура плавления* – температура равновесного фазового перехода кристаллического твердого тела в жидкое состояние при постоянном внешнем давлении. Для кристаллических полимеров под температурой плавления понимают максимальную температуру интервала плавления кристаллической фазы<sup>16</sup> [4].

*Температура вспышки* – это наименьшая температура испытуемого образца, скорректированная на барометрическое давление 101,3 кПа, при которой при поднесении источника зажигания происходит воспламенение паров образца и распространение пламени на поверхности жидкости при установленных условиях испытания<sup>17</sup>.

*Температура воспламенения* – наименьшая температура испытуемого образца, скорректированная на барометрическое давление 101,3 кПа, при которой при поднесении источника зажигания происходит воспламенение паров образца и устойчивое горение в течение не менее 5 с при установленных условиях испытания<sup>18</sup>.

Как следует из приведенных выше понятий, горение материалов не всегда можно однозначно выявить по фактам термической деструкции. По своей сути горение – химическая реакция высокотемпературного окисления материала, сопровождающаяся выделением тепла и потерей массы, однако в условиях анализа крупномасштабных испытаний горючих материалов в остывшем состоянии не всегда можно однозначно ответить на вопрос, имело ли место горение, либо это всего лишь термическая деструкция материала от воздействия повышенных, но допиролизных температур. Для многих материалов единственно возможным критерием горения остается обугливание, однако для термопластичных полимеров эта характеристика вряд ли может быть однозначно определена. Поэтому для более качественной интерпретации результатов крупномасштабных испытаний авторами рекомендованы и проведены модельные испытания экструдированного пенополистирола в условиях воздействия повышенных температур на установке по оценке воспламеняемости по ГОСТ 30402 и определению температуры вспышки по ГОСТ 4333.

Общий вид экспериментальной установки для проведения тепловых испытаний экструдированного пенополистирола представлен на рисунке 1.

Для проведения испытаний на установке по оценке воспламеняемости изготовлено 5 и 6 стандартных мелкомасштабных образцов различных производителей с усредненными размерами 170×170×58(*h*) мм. Параметры образцов, отобранных для испытаний, представлены в таблице 1.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Модельные образцы горючего утеплителя подвергали лучистому тепловому потоку посредством радиационной панели 1 экспериментальной установки, значение которого условно соответствовало температуре

<sup>13</sup> См. сноску 11.

<sup>14</sup> ГОСТ 32794-2014. Межгосударственный стандарт. Композиты полимерные. Термины и определения. – Введ. 01.09.15. – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2014. – 94 с.

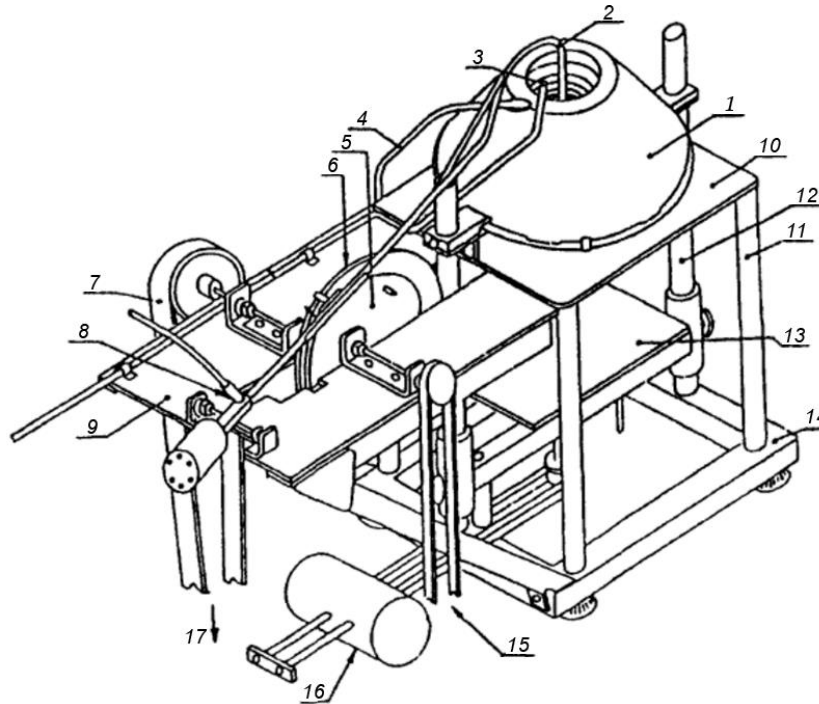
<sup>15</sup> См. сноску 14.

<sup>16</sup> См. сноску 14.

<sup>17</sup> См. сноску 10.

<sup>18</sup> См. сноску 10.

нагревательного элемента радиационной панели: 175, 200, 230, 260, 300 и 330 °С (что эквивалентно тепловому потоку на исходном уровне верха образца, соответственно, 1,43; 1,79; 2,48; 3,00; 4,32 и 5,00 кВт).



1 – радиационная панель с нагревательным элементом; 2 – подвижная горелка; 3 – вспомогательная стационарная горелка; 4 – силовой кабель нагревательного элемента; 5 – кулачок с ограничителем хода для ручного управления подвижной горелкой; 6 – кулачок для автоматического управления подвижной горелкой; 7 – приводной ремень; 8 – втулка для подсоединения подвижной горелки к системе подачи топлива; 9 – монтажная плита для системы зажигания и системы перемещения подвижной горелки; 10 – защитная плита; 11 – вертикальная опора; 12 – вертикальная направляющая; 13 – подвижная платформа для образца; 14 – основание опорной станины; 15 – ручное управление; 16 – рычаг с противовесом; 17 – привод к электродвигателю

Рисунок 1. – Общий вид установки по оценке воспламеняемости<sup>19</sup>

Таблица 1. – Параметры образцов экструдированного пенополистирола, отобранных для испытаний

Наименование производителя изделий для образцов	№ образца	Масса, г	Размеры 1-й стороны, мм	Размеры 2-й стороны, мм	Средняя толщина, мм
Производитель «А»	1	36,85	168	165	49,10
	2	38,70	167	169	49,35
	3	38,15	169	169	48,33
	4	37,70	168	167	49,05
	5	38,55	167	168	49,35
Производитель «Б»	1	42,80	167	168	57,8
	2	42,71	166	167	57,7
	3	44,33	169	170	58,5
	4	44,29	170	170	58,2
	5	42,88	169	169	58,3
	6	43,18	169	169	57,9

Модельный образец подвергали нагреву только после установления равновесия стационарного лучистого теплового потока с одновременным удалением экранирующей пластины и включением регистратора времени. Тепловое воздействие на каждый образец осуществляли в течение 10 мин. Изменение температуры в геометрическом центре обогреваемой поверхности и в геометрическом центре среднего по толщине сечения образцов

<sup>19</sup> См. сноску 7.

фиксируют посредством двух термоэлектрических преобразователей, установленных в соответствии со схемой (рис. 2). Для части образцов фиксируют изменение температуры в геометрическом центре нижней необогреваемой поверхности (при термической усадке более половины толщины образца)<sup>20</sup>. Дополнительно фиксируют характер и степень повреждения образцов в результате теплового воздействия, а также массу образцов до и после испытаний.



Рисунок 2. – Схема измерения температуры

Результаты испытаний экструдированного пенополистирола производителей «А» и «Б» представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты испытаний экструдированного пенополистирола производителей «А» и «Б»

№ п/п	Значения температур, °С T1 / T2 / T3 / T4		Экструдированный пенополистирол производителя «А» толщиной 50 мм		Экструдированный пенополистирол производителя «Б» толщиной 58 мм	
	А	Б	фото повреждений	$\Delta L$ , мм / $\Delta m$ , %	фото повреждений	$\Delta L$ , мм / $\Delta m$ , %
0.	$\frac{150}{79}$ $\frac{46}{-}$	$\frac{150}{79}$ $\frac{46}{-}$		$\frac{0}{0,001}$	испытание не проводилось	-
1.	$\frac{175}{110}$ $\frac{62}{-}$	$\frac{175}{84}$ $\frac{53}{-}$		$\frac{2,0}{0,081}$		$\frac{0}{0,023}$

<sup>20</sup> Вследствие высокой термической усадки схема измерения представлена для начального состояния образцов и не в полной мере соответствует схеме измерения деформированных образцов.

№ п/п	Значения температур, °C T1 / T2 / T3 / T4		Экструдированный пенополистирол производителя «А» толщиной 50 мм		Экструдированный пенополистирол производителя «Б» толщиной 58 мм	
	А	Б	фото повреждений	$\Delta L$ , мм / $\Delta m$ , %	фото повреждений	$\Delta L$ , мм / $\Delta m$ , %
2.	$\frac{200}{111}$ $\frac{60}{-}$	$\frac{200}{104}$ $\frac{51}{-}$		$\frac{5,0}{0,052}$		$\frac{-0,5}{0,047}$
3.	$\frac{230}{108}$ $\frac{115}{-}$	$\frac{230}{120}$ $\frac{65}{-}$		$\frac{15...24}{0,393}$		$\frac{6,0...10}{0,013}$
4.	$\frac{260}{-}$ $\frac{133}{58}$	$\frac{260}{120}$ $\frac{100}{-}$		$\frac{39...45}{0,743}$		$\frac{27...30}{0,316}$
5.	$\frac{300}{-}$ $\frac{157}{-}$	$\frac{300}{115}$ $\frac{136}{-}$		$\frac{50}{0,778}$		$\frac{48...50}{0,443}$
6.	$\frac{330}{137}$ $\frac{46}{-}$	$\frac{330}{137}$ $\frac{139}{-}$	испытание не проводилось	-		$\frac{58}{0,533}$

Примечание. T1 – температура на поверхности нагревательного элемента установки; T2 – на поверхности образца; T3 – в середине образца; T4 – на необогреваемой поверхности образца;  $\Delta L$  – термическая усадка, мм;  $\Delta m$  – потеря по массе, %.

Анализ результатов испытаний экструдированного пенополистирола производителя «А» для образца:

– № 0 температура обогреваемой поверхности составила 79 °С, в середине образца – 49 °С, видимые повреждения отсутствовали;

– № 1 температура обогреваемой поверхности составила 110 °С, в середине образца – 62 °С, зафиксирована термическая усадка неправильной в плане формы размером 50...100 мм и глубиной до 2 мм;

– № 2 температура обогреваемой поверхности составила 111 °С, в середине образца – 60 °С, зафиксирована термическая усадка сферической в плане формы диаметром 120...130 мм и глубиной до 5 мм;

– № 3 температура обогреваемой поверхности составила 108 °С, в середине образца – 115 °С, зафиксирована термическая усадка сферической в плане формы диаметром 145 мм и глубиной 15...24 мм (что составляет практически 50 % толщины образца), для поверхности, подверженной усадке, характерно трещинообразование и более темный оттенок цвета. В дальнейшем для указанных образцов фиксировали изменение температуры в геометрическом центре необогреваемой поверхности;

– № 4 температура обогреваемой поверхности составила 133 °С, на его необогреваемой поверхности – 58 °С, зафиксирована термическая усадка сферической в плане формы диаметром 155...160 мм и глубиной 39,0...45,0 мм (что составляет более 80 % толщины образца), поверхность, подверженная усадке, имела видимые скопления (сгустки) квазирасплавленного (поврежденного) материала на участках (вершинах) между трещинами шириной 3...20 мм, цвет сгустков варьировался от светло-серого к темно-серому;

– № 5 температура обогреваемой поверхности составила 157 °С, на его необогреваемой поверхности – 91 °С, зафиксирована термическая усадка сферической в плане формы диаметром 150–152 мм на всю толщину образца, скопления (сгустки) квазирасплавленного (поврежденного) материала на поверхности приобрели более выраженный характер, цвет сгустков приближался к черному с характерным остеклованным отблеском.

Анализ результатов испытаний экструдированного пенополистирола производителя «Б» для образца:

– № 1 температура обогреваемой поверхности составила 84 °С, в середине образца – 53 °С, видимые повреждения отсутствовали;

– № 2 температура обогреваемой поверхности составила 104 °С, в середине образца – 51 °С, зафиксировано незначительное термическое расширение;

– № 3 температура обогреваемой поверхности составила 120 °С, в середине образца – 65 °С, зафиксирована термическая усадка сферической в плане формы диаметром 130 мм и глубиной 6,0...10,0 мм;

– № 4 температура обогреваемой поверхности составила 120 °С, в середине образца – 100 °С, зафиксирована термическая усадка сферической в плане формы диаметром 145 мм и глубиной 27...30 мм (что составляет 50 % толщины образца), поверхность, для поверхности, подверженной усадке, характерно трещинообразование и более темный оттенок цвета;

– № 5 температура обогреваемой поверхности составила 115 °С, в середине образца – 136 °С, зафиксирована термическая усадка сферической в плане формы диаметром 150 мм и глубиной 48...50 мм (что составляет более 80 % толщины образца), поверхность, подверженная усадке, имела видимые скопления (сгустки) квазирасплавленного (поврежденного) материала на участках (вершинах) между трещинами шириной 5...15 мм, цвет сгустков варьировался от темно-серого к черному;

– № 6 температура обогреваемой поверхности составила 137 °С, в середине образца – 139 °С, зафиксирована термическая усадка сферической в плане формы диаметром 160–165 мм на всю толщину образца, скопления (сгустки) квазирасплавленного (поврежденного) материала на поверхности приобрели более выраженный характер, цвет сгустков



приближался к черному с характерным остекловавшимся отблеском. После демонтажа образца из установки произошло его деформирование от краев к геометрическому центру.

Во всех испытаниях потеря массы образцов не превысила 0,778 %, что свидетельствует об отсутствии процессов активного пиролиза, т.е. факта горения.

Анализ повреждений экструдированного пенополистирола свидетельствует о том, что для образцов различных производителей характерны идентичные термические повреждения, приобретаемые после повышения температуры поверхности выше 100 °С, с образованием скопления (сгустков) квазирасплавленного (поврежденного) материала на обогреваемой поверхности с температурой около 120...140 °С, при приближении температуры к 160 °С повреждения более выражено соответствуют расплаву. Однако, если термическому повреждению не подвержена вся толщина образца, температура на поверхности остается в диапазоне 120...140 °С в связи с постоянным снижением интенсивности лучистого теплового потока в ходе процесса усадки (за счет увеличения расстояния от радиационной панели в процессе усадки).

Очевидно, что температура стеклования пенополистиролов определяется химическим составом и строением полимерной цепи и не является жестко определенной величиной, однако для моделирования термического повреждения экструдированного пенополистирола в виде термической усадки целесообразно использовать критическую температуру, не превышающую 100 °С, что соответствует результатам других исследований в этой области [6]. Согласно результатам исследований [6] температура стеклования пенополистиролов определяется химическим составом и строением полимерной цепи и не является жестко определенной величиной.

**Модельные испытания экструдированного пенополистирола на установке по оценке температуры вспышки.** Методика эксперимента заключалась в следующем. Для проведения испытаний предварительно вырезали заготовки из экструдированного пенополистирола средним размером 50×20×20 мм. После чего заготовки помещали в открытый тигель, разогретый до температуры порядка 160 °С (температуру корректировали исходя из равновесия процессов плавления и испарения материала) для получения расплава (рис. 3). Количество заготовок выбирали для получения необходимого объема расплава для проведения испытаний по определению температуры вспышки по ГОСТ 4333.



Рисунок 3. – Общий вид испытаний

Тигель с расплавом помещали в установку ТВО-ЛАБ-01, предварительно нагретую до температуры 160 °С. При повышении температуры образца на каждые 2 °С в автоматическом режиме применялось зажигательное устройство, которое в течение 1 с проводило пламенем по дуге в одном направлении через центр тигля.

Результаты испытаний (рис. 4–5) показали, что для экструдированного пенополистирола вспышка паров может происходить только при достижении температуры кипения, сопровождающегося парообразованием по всему объему жидкости (расплава).

Полученные данные свидетельствуют, что нагрев экструдированного пенополистирола в других условиях испытаний до меньших температур весьма маловероятно приведет

к его вспышке и воспламенению. Вместе с тем процесс вспышки и воспламенения экструдированного пенополистирола соответствует кипению расплава, а значит, при его неполном выгорании всегда будут сохраняться следы газообразования.



Рисунок 4. – Фиксация температуры вспышки на установке ТВО-ЛАБ-01 по ГОСТ 4333 экструдированного пенополистирола производителя «А»



Рисунок 5. – Фиксация температуры вспышки на установке ТВО-ЛАБ-01 по ГОСТ 4333 экструдированного пенополистирола производителя «Б»

### Заключение

Проведены модельные испытания экструдированного пенополистирола различных производителей на установке по оценке воспламеняемости ГОСТ 30402, а также на установке по оценке температуры вспышки ГОСТ 4333.

Результаты исследований экструдированного пенополистирола на установке по оценке воспламеняемости представлены в таблице 2 настоящей статьи. Во всех испытаниях потеря массы образцов не превысила 0,778 %, что свидетельствует об отсутствии процессов активного пиролиза.

Анализ повреждений экструдированного пенополистирола свидетельствует о том, что для образцов характерны, независимо от производителя, идентичные термические повреждения, приобретаемые после повышения температуры поверхности выше 100 °С, с образованием скоплений (сгустков) квазирасплавленного (поврежденного) материала на обогреваемой поверхности с температурой около 120...140 °С. При приближении температуры к 160 °С повреждения более выражено соответствуют расплаву, однако, если термическому повреждению не подвержена вся толщина образца, температура на поверхности остается в диапазоне 120...140 °С в связи с постоянным снижением интенсивности лучистого теплового потока в ходе процесса усадки. При изменении состава (читай – производителя) экструдированного полистирола может быть получена несколько более высокая термостойкость, выражающаяся в меньшей глубине повреждений при равных значениях теплового потока.

Для моделирования термического повреждения экструдированного пенополистирола в виде термической усадки целесообразно использовать критическую температуру, не превышающую 100 °С.

Результаты испытаний на установке по оценке температуры вспышки показали, что для экструдированного пенополистирола вспышка паров происходит при достижении температуры кипения, сопровождающегося парообразованием по всему объему жидкости (расплава). Для исследованных образцов экструдированного пенополистирола температура вспышки (кипения) составила 241...252 °С. Полученные данные свидетельствуют, что нагрев экструдированного пенополистирола в других условиях испытаний до меньших температур весьма маловероятно приведет к его вспышке и воспламенению. Кроме того, процесс вспышки и воспламенения экструдированного пенополистирола соответствует кипению расплава, а значит, при его неполном выгорании всегда будут сохраняться следы газообразования.

Для оценки термических повреждений в условиях крупномасштабных испытаний целесообразно сопоставлять повреждения экструдированного полистирола с таблицей 2 настоящей статьи, с учетом данных температурных измерений. Факт горения экструдированного пенополистирола может быть подтвержден только наличием вспененного остатка, свидетельствующего о кипении расплава.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) в рамках проекта Ф23В-013 «Анализ композитных строительных конструкций в условиях высокой температуры с использованием методов компьютерного моделирования» (государственная регистрация № 20230543).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуюмджян, П.П. О пожароопасности полистирольных пенопластов строительного назначения / П.П. Гуюмджян, С.В. Коканин, А.А. Пискунов // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 8. – С. 4–8. – EDN: OFXCMD.
2. Етумян, А.С. Пожарная опасность теплоизоляционных материалов из пенополистирола / А.С. Етумян, О.И. Молчадский, Н.И. Константинова // Пожарная безопасность. – 2006. – № 6. – С. 66–68. – EDN: KPYGNL.
3. Кодолов, В.И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов / В.И. Кодолов. – М.: Химия, 1976. – 157 с.
4. Тугов, И.И. Химия и физика полимеров: учебное пособие для хим. технол. специальностей вузов / И.И. Тугов, Г.И. Кострыкина. – М.: Химия, 1989. – 430 с.
5. Нильсен, Л.Е. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л.Е. Нильсен: пер. с англ. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1978. – 312 с.
6. Кобелев, А.А. Термическое поведение полимерной теплоизоляции пониженной горючести / А.А. Кобелев [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27, № 4 – С. 13–23. – DOI: 10.18322/PVB/2018.27.04.13-23. – EDN: OVBTQD.

**Свойства горючего экструдированного пенополистирола в условиях допиролизного высокотемпературного нагрева**

**Pre-combustion thermal properties of combustible extruded polystyrene obtained by high temperature heating**

***Кудряшов Вадим Александрович***

кандидат технических наук, доцент  
Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», кафедра  
пожарной безопасности, профессор  
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, Беларусь, г. Минск  
Email: vadkud@gmail.com  
SPIN-код: 1417-4096

***Vadim A. Kudryashov***

PhD in Technical Sciences, Associate Professor  
State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Fire Safety, Professor  
Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Belarus, Minsk  
Email: vadkud@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-4889-1060

***Ивлев Юрий Петрович***

Учреждение «Научно-исследовательский  
институт пожарной безопасности и проблем  
чрезвычайных ситуаций» Министерства  
по чрезвычайным ситуациям Республики  
Беларусь, начальник испытательно-  
исследовательского полигона  
Адрес: ул. Солтыса, 183а,  
220046, Минск, Беларусь  
Email: ivlev\_83@outlook.com

***Yuriy P. Ivlev***

Institution «Scientific and Research Institute  
of Fire Safety and Emergency Situations»  
of the Ministry for Emergency Situations  
of the Republic of Belarus,  
Head of the Testing and Research Ground  
Address: Soltysa str., 183a,  
220046, Minsk, Belarus  
Email: ivlev\_83@outlook.com

***Дробыш Антон Сергеевич***

Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», отдел научной  
и инновационной деятельности,  
начальник отдела  
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, Беларусь, г. Минск  
Email: aantox@mail.ru  
SPIN-код: 3169-0097

***Anton S. Drobysch***

State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Department of Scientific and Innovation Activity,  
Head of Department  
Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Belarus, Minsk  
Email: aantox@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-9528-3108

***Ботян Сергей Сергеевич***

кандидат технических наук, доцент  
Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты МЧС  
Беларуси», кафедра пожарной безопасности,  
начальник кафедры  
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, Беларусь, г. Минск  
Email: aseckis@mail.ru  
SPIN-код: 5948-1623

***Sergey S. Botyan***

PhD in Technical Sciences, Associate Professor  
State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Fire Safety, Head of Chair  
Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Belarus, Minsk  
Email: aseckis@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-8593-4413

## PRE-COMBUSTION THERMAL PROPERTIES OF COMBUSTIBLE EXTRUDED POLYSTYRENE OBTAINED BY HIGH TEMPERATURE HEATING

Kudryashov V.A., Ivlev Yu.P., Drobysh A.S., Botyan S.S.

*Purpose.* Based on experimental data and theoretical research, to assess the pre-combustion thermal properties of combustible extruded polystyrene insulation obtained by high-temperature heating and their influence on the fire resistance and fire hazard class of structures with profiled sheet roofing.

*Methods.* Detailed examination of the behavior of combustible extruded polystyrene under elevated temperature conditions was conducted through testing of model samples using equipment for assessing flammability and determining flash point in an open crucible TVO-LAB-01 with an expanded base of measuring instruments.

*Findings.* Model test results indicate that identical thermal damage is characteristic for samples from different manufacturers, acquired after surface temperature increases above 100 °C, with the formation of accumulations (clusters) of quasi-molten (damaged) material on the heated surface at temperatures around 120...140 °C. As the temperature approaches to 160 °C, the damage becomes more pronounced, corresponding to melting. If the thermal power is insufficient to form a melt throughout the material volume, its shrinkage occurs until the temperature decreases along the axis of the heat flow to the melt temperature (120...140 °C).

To assess thermal damage in large-scale tests, it is advisable to compare the damage to extruded polystyrene with Table 2 of this article, considering temperature measurement data. The fact of burning of extruded polystyrene can only be confirmed by the presence of foamed residue indicating boiling of the melt.

To model the thermal damage of extruded polystyrene in the form of thermal shrinkage it is advisable to use a critical temperature which does not exceed 100 °C.

*Application field of research.* The research results can be applied in the design and construction of structures with profiled sheet roofing using a combined approach to determine the required amount of combustible and non-combustible insulation, combustible roofing material, and vapor barrier.

*Keywords:* flammability, flash point, model tests, extruded polystyrene, profiled sheet, material damage, fire danger.

(The date of submitting: March 29, 2024)

### REFERENCES

1. Guyumdzhyan P.P., Kokanin S.V., Piskunov A.A. O pozharoopasnosti polistirol'nykh penoplastov stroitel'nogo naznacheniya [About fire danger of styrene polyfoams of building appointment]. *Fire and Explosion Safety*, 2011. Vol. 20, No. 8. Pp. 4–8. (rus). EDN: OFXCMD.
2. Etumyan A.S., Molchadskiy O.I., Konstantinova N.I. Pozharnaya opasnost' teploizolyatsionnykh materialov iz penopolistirola [Fire hazard of heat insulating materials based on cellular polystyrene]. *Fire Safety*, 2006. No. 6. Pp. 66–68. (rus). EDN: KPYGNL.
3. Kodolov V.I. *Goryuchest' i ognestoykost' polimernykh materialov* [Flammability and fire resistance of polymeric materials]. Moscow: Khimiya, 1976. 157 p. (rus)
4. Tugov I.I., Kostyrykina G.I. *Khimiya i fizika polimerov* [Chemistry and physics of polymers]: tutorial for chemical engineering specialties of universities. Moscow: Khimiya, 1989. 430 p. (rus)
5. Nielsen L.E. *Mechanical properties of polymers and composites*: translation from English. Moscow: Khimiya, 1978. 312 p. (rus)
6. Kobelev A.A., Kruglov E.Yu., Aseeva R.M., Serkov B.B., Shutov F.A. Termicheskoe povedenie polimernoy teploizolyatsii ponizhennoy goryuchesti [Thermal behavior of polymer thermal insulation with the reduced combustibility]. *Fire and Explosion Safety*, 2018. Vol. 27, No. 4. Pp. 13–23. (rus). DOI: 10.18322/PVB/2018.27.04.13-23. EDN: OVBTQD.