

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Политехнический институт  
Факультет «Механико-технологический»  
Кафедра «Безопасности жизнедеятельности»

Рецензент, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой БЖД

\_\_\_\_\_/А.И. Сидоров/

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Экспериментальные исследования теплофизических свойств теплоизоляционного  
материала пенополистирола, обработанного водным раствором жидкого стекла  
с негорючими добавками

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ  
ЮУрГУ– 20.04.01.2018.582 ПЗ МД

Научный руководитель, доцент

\_\_\_\_\_/И.П. Палатинская/

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Автор диссертации

студент группы П-267

\_\_\_\_\_/Е.С. Дементьева /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Нормоконтролер, доцент

\_\_\_\_\_/Г.А. Полунин /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Политехнический институт  
Факультет «Механико-технологический»  
Кафедра «Безопасность жизнедеятельности»  
Направление 20.04.01 «Техносферная безопасность»  
Магистерская программа «Пожарная безопасность»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой БЖД  
\_\_\_\_\_/ А.И. Сидоров /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

ЗАДАНИЕ  
на подготовку магистерской диссертации

Дементьевой Елены Сергеевны

(Ф. И.О. полностью)

Группа П-267

1 Тема диссертации:

Экспериментальное исследование теплофизических свойств  
теплоизоляционного материала, обработанного водным раствором жидкого  
стекла с негорючими добавками пенополистирола

утверждена приказом по университету от \_\_\_\_\_ 2018 г. № \_\_\_\_\_

2 Срок сдачи магистром законченной диссертации 25.06.2018

3 Исходные данные к диссертации: учебные материалы, научные статьи,  
патенты по теплоизоляционному материалу пенополистиролу

4 Содержание (перечень подлежащих разработке вопросов)

ВВЕДЕНИЕ

Глава 1. Актуальность работы

Глава 2. Оценка эффективности огнезащитных покрытий

Глава 3. Экспериментальное исследование теплопроводности, температуропроводности и водопоглощения пенополистирола, обработанного огнезащитными покрытиями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Дата выдачи задания \_\_\_\_\_ 06.03.2018 \_\_\_\_\_

Научный руководитель \_\_\_\_\_ /И.П. Палатинская/  
(подпись) (И.О.Ф.)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ /Е.С. Дементьева /  
(подпись магистранта) (И.О.Ф.)

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении руководителя
Введение	25.05.2018	
Глава 1	15.04.2018	
Глава 2	25.04.2018	
Глава 3	05.05.2018	
Заключение	04.06.2018	
Графический материал	15.06.2018	

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ / А.И. Сидоров /

Руководитель работы \_\_\_\_\_ / И.П. Палатинская /

Магистрант \_\_\_\_\_ / Е.С. Дементьева /

## РЕФЕРАТ

Дементьева Е.С. – Челябинск:  
ЮУрГУ, П-267, 2018. – 65 с., 24 ил.,  
20 табл., библиогр. список –  
59 наим.

Пенополистирол является одним из лучших теплоизоляционных материалов благодаря своим высоким прочностным и теплофизическим свойствам, низкой стоимости. Эти свойства позволяют использовать данный материал в качестве тепловой изоляции отдельных элементов строительных конструкций.

В ходе работы проведена оценка пожароопасных свойств пенополистирола. Он является горючим материалом, в связи с чем, был предложен метод снижения горючести пенополистирола путем поверхностного нанесения огнезащитных покрытий. Пенополистирол, имея низкий коэффициент теплопроводности, был проверен на изменение теплофизических свойств после обработки огнезащитными составами. Оценены такие характеристики как адгезия огнезащитных покрытий, как после сушки образцов, так и во время их сжигания; степень выгорания, коэффициент теплопроводности, тепловое сопротивление и водопоглощение.

Таким образом, выработана методика оценки пожароопасности и теплофизических свойств пенополистирола, обработанного огнезащитными покрытиями.

Результаты данных исследований применимы при строительстве малоэтажных зданий и частных построек.

## SYNOPSIS

E.S. Dementeva – Chelyabinsk, SUSU, P-267, 2018. – 65 p., 24 il., 20 tabl., Bibliografy – 59.

Expanded polystyrene is one of the best heat insulating materials because of its high strength and low thermophysical properties and low cost/ These characteristics make polystyrene usable for heat insulation of single building construction elements.

Polystyrene fire behavior was researched. Since the materials flammable a fire behavior reduction method was proposed. This method implies surface fireproofing coating. Polystyrene has low thermal conductivity coefficient. Thermophysical properties changes were studied after fireproofing treatment. Estimation of fireproofing coating adhesion after drying and during burning processes; burnout degree, thermal conductivity coefficient, thermal resistance and water absorption.

This way the procedure of fireproofing coated polystyrene thermophysical properties evaluation was formulated.

Investigation results are applicable body of construction for example low-rise and private buildings.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ .....	10
1.1 Развитие производства пенополистирола .....	10
1.2 Пожароопасные и теплофизические свойства пенополистирола .....	12
1.3 Требования нормативной документации по пенополистиролу .....	19
1.4 Исследование пожароопасных свойств пенополистирола .....	22
2 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ.....	28
2.1 Подбор огнезащитных составов .....	29
2.2 Обработка огнезащитными составами образцов пенополистирола .....	32
2.3 Подбор метода оценки адгезионных свойств покрытий .....	34
2.4 Оценка адгезионных свойств покрытий .....	38
2.5 Оценка выгорания обработанных образцов пенополистирола .....	40
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ И ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА, ОБРАБОТАННОГО ОГНЕЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ .....	47
3.1 Обработка составами образцов ППС .....	47
3.2 Определение коэффициента теплопроводности.....	49
3.3 Определение теплового сопротивления .....	50
3.4 Определение водопоглощения .....	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	56
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	59

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы:** в Российской Федерации охраняются труд и здоровье людей [1]. Согласно статье 34 Федерального закона № 69 [2], граждане Российской Федерации имеют право на защиту их жизни, здоровья и имущества в случае пожара, возмещение ущерба, причиненного пожаром, получение информации по вопросам пожарной безопасности. С этой целью, по статье 5 Федерального закона № 123 [3], объекты защиты должны иметь систему обеспечения пожарной безопасности.

Также по пункту 8 Технического регламента № 384 [4] здание или сооружение должно быть построено таким образом, чтобы в процессе эксплуатации здания или сооружения исключалась возможность возникновения пожара, обеспечивалось предотвращение или ограничение опасности задымления здания или сооружения при пожаре и воздействия опасных факторов пожара на людей и имущество, обеспечивались защита людей и имущества от воздействия опасных факторов пожара и (или) ограничение последствий воздействия опасных факторов пожара на здание или сооружение.

Пожар – это неконтролируемый процесс горения, сопровождающийся уничтожением материальных ценностей и создающий опасность для жизни и здоровья людей.

Предотвращение пожара должно осуществляться путем соблюдения правил пожарной безопасности при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. В связи с выше изложенным, необходимо обратить внимание на пожароопасность использования теплоизоляционного материала – пенополистирола, который является сильно горючим материалом с группой горючести Г4.

Пенополистирол (ППС) – ячеистый газонаполненный материал, имеющий низкую теплопроводность, – как основное достоинство, является водонепроницаемым и прочным. Широко используется в строительстве, где

применяется на всех этапах строительства в качестве утеплительного и изолирующего материала.

Гетерофазная структура пенополистирольных материалов способна сохранять энергию от внешнего источника тепла в поверхностных слоях. В результате эти материалы быстро воспламеняются и распространяют огонь, увеличивая вероятность усиления пожара. Также горение пенополистирола сопровождается выделением токсичных веществ, что приводит к гибели людей при пожаре с пенополистиролом [25]. Одним из известных пожаров, унесших жизни свыше 150 человек, был пожар в клубе «Хромая лошадь» в городе Пермь в 2009 году. Пожаров с участием пенополистирола было еще много.

По техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности [3] статья 134 «Строительные материалы применяются в зданиях и сооружениях в зависимости от их функционального назначения и пожарной опасности». Выбирая марку пенополистирола необходимо учитывать его пожарно-технические показатели (таблица 27 приложения ФЗ N 123 [3]), которые в зависимости от назначения могут учитываться или нет.

На сегодняшний день проблема пожароопасности пенополистирола остается открытой. Для такого широко используемого в строительстве дешёвого материала необходимо применять эффективные огнезащитные покрытия, чтобы максимально увеличить время до возгорания пенополистирола при начале горения и, при этом, сохранить теплофизические свойства пенополистирола.

**Цель работы:** исследование пожароопасных и теплофизических свойств пенополистирола, обработанного огнезащитными составами на основе водного раствора жидкого стекла.

**Реализация цели требует постановки и решения следующих основных задач исследования:**

- а) анализ литературных источников по применению пенополистирола;
- б) исследование возможности снижения пожарно-технических показателей пенополистирола с помощью покрытий;



в) исследование пожарно-технических показателей пенополистирола, обработанного отобранными покрытиями;

г) исследование теплофизических свойств пенополистирола, обработанного покрытиями;

д) анализ полученных результатов.

**Объект исследования:** теплоизоляционный материал пенополистирол марки ППС-20 и ППС-30.

**Предмет исследования:** теплофизические свойства пенополистирола, обработанного огнезащитными составами на основе водного раствора жидкого стекла.

**Научная новизна:** состоит в разработке метода снижения горючести пенополистирола путем поверхностного покрытия и, при этом, сохранения важного свойства материала – теплопроводности.

**Апробация результатов исследования:** результаты работы представлены на следующих конференциях:

- LVI Международная научно-практическая конференция «Достижения науки – агропромышленному комплексу», февраль 2017 г., г. Челябинск;

- XXII Всероссийская студенческая научно-практическая конференция с международным участием, посвященная году экологии «Проблемы безопасности современного мира», апрель 2017 г., г. Иркутск;

- IV Всероссийская студенческая конференция (с международным участием) «Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи», апрель 2017, г. Челябинск;

- Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса, март 2018 г., г. Санкт-Петербург;

- International Forum-Contest of Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources», апрель 2018 г., г. Санкт-Петербург.

**Публикации:** по материалам диссертации опубликованы научные статьи:

- в научном журнале Modern Science. 2016. – №10. – С. 22–26.

- В сборнике по материалам международной научно-практической конференции: Сервис технических систем – агропромышленному комплексу России. ЮУрГАУ, г. Челябинск (февраль 2017), с. 159–165.

- в сборнике по материалам докладов XXII Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием: Безопасность – 2017. ИРНТУ, г. Иркутск (апрель 2017), с. 241–243.

- в сборнике по материалам IV Всероссийской студенческой конференции: БЖД глазами молодежи. ЮУрГУ, г. Челябинск (апрель 2017), с. 251–255.

- в научном журнале, входящем в перечень ВАК: Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2017. – Т. 17, № 4. – С. 44–51.

- в научном журнале, входящем в перечень ВАК: Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2018. – Т. 18, № 1. – С. 47–52.

- В сборнике по материалам международного форума-конкурса: Проблемы недропользования. Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, (апрель 2018), с. 155.

В патентный отдел ЮУрГУ в 2018 году подана одна заявка на изобретение.

**Структура:** диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и библиографического списка.

**Объем работы:** содержит 65 страниц машинописного текста, 20 таблиц, 24 рисунка. Библиографический список включает 59 источника.

## 1 АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Строительная отрасль с каждым годом развивается, внедряя новые технологии по строительству и строительные материалы на мировой рынок. Одним из таких материалов является пенополистирол (ППС).

Пенополистирол – жесткий теплоизоляционный материал с закрытой ячеистой структурой, полученный путем вспенивания и спекания гранул вспенивающегося полистирола или одного из его сополимеров [22].

### 1.1 Развитие производства пенополистирола

Появление ППС связано с открытием вещества, названного стиролом. Впервые в 1831 г. химическое соединение стирол было получено путем нагревания смолы бальзамного дерева *Storax* (Стиракс), основные компоненты которого – коричная кислота, ванилин и стирол. Смола этого дерева использовалась в качестве душистого вещества в парфюмерии, антисептика и одного из компонентов состава для мумифицирования в Древнем Египте около 3000 лет назад [6].

Впервые пенополистирол, который хорошо известен нам в настоящее время, был изобретен в Германии в 1950-х г. В СССР промышленное производство пенополистирола по прессовому методу (ПС-1) начато в 1939 г. В 1958 г. освоено производство беспрессового пенополистирола (ПСБ). В 1961 в СССР была освоена технология производства самозатухающего пенополистирола (ППС). Был принят стандарт ГОСТ 15588-86 [15], по мере расширения применения ППС в промышленности [25].

В XXI веке производство шагнуло вперед. Совершенствуются технологии изготовления ППС. Пенополистирол выпускают трех видов: прессовый, беспрессовый и экструзионный (экструдированный). Каждый имеет свой способ получения, но они имеют одинаковый химический состав полистирола, и различаются лишь добавками. Опыт применения пенополистирола в промышленности составляет почти 70 лет [6]. Основными полимерными

строительными материалами стали вспененный (EPS) и экструдированный (XPS) пенополистиролы [35], которые имеют широкое применение (см. рисунок 1) [25].

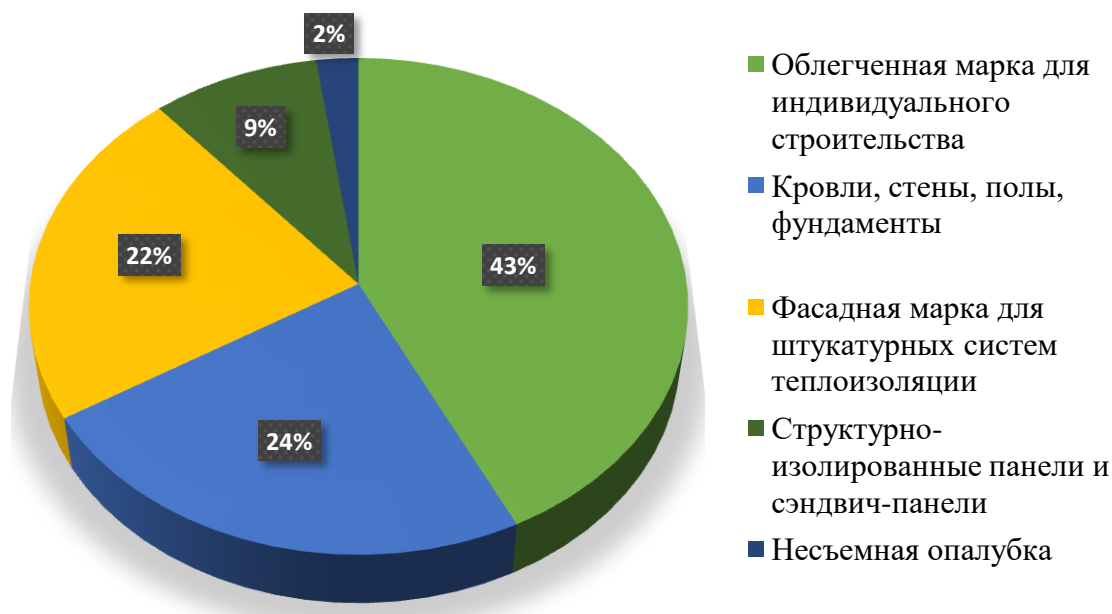


Рисунок 1 – Структура потребления ППС в России по состоянию на 2015 год [49]

В России на данный момент существует 3 основных вида пенополистирола:

- прессовый;
- беспрессовый;
- экструзионный.

Они были изучены в моей предыдущей работе [25], и по этим исследованиям наиболее потребляемым в строительстве утеплителем считается беспрессовый пенополистирол (ППС), который по ГОСТ 15588-2014 [14] обязательно должен быть с антипиреновыми добавками. Он имеет высокую химическую стойкость легко поддается механической обработке, у него выше водостойкость, чем у прессового и стоимость ниже, чем у экструзионного пенополистирола.

В строительстве малоэтажных домов на долю беспрессового пенополистирола, как теплоизоляционного материала, приходится 70% от общего объема пенопластов [8]. Преимущественно применяется несъемная стеновая опалубка из пенополистирола [31].

## 1.2 Пожароопасные и теплофизические свойства пенополистирола

Из главных достоинств пенополистирола выделяют его низкую теплопроводность и простоту обработки. Он прочный, легкий и водонепроницаемый. Подробнее об этом можно прочитать в предыдущей моей работе [25]. Имея такие физические характеристики, ППС популярен во многих странах, а особенно в США и Европе, где лидерами по потреблению пенополистирола являются Германия, Польша, Италия, Франция. Статистика Европейской Ассоциации Association pour la promotion du PSE dans la construction показала, что 8 из 10 частных домов в Европе утеплены качественным вспененным и формованным полистиролом. На рисунке 2 наглядно показана толщина теплоизоляционных материалов, необходимая для эффективной теплоизоляции помещения. Пенополистирол имеет меньшую толщину, поэтому дома, утепленные им, менее материалозатратны и более экономичны [44].



Рисунок 2 – Эффективная толщина теплоизоляционных материалов в см [28]

Пенополистирол, благодаря малой кажущейся плотности и высокой пористости имеет высокие показатели теплофизических свойств в отличие от показателей других широкоприменяемых теплоизоляционных материалов (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика строительных материалов согласно их теплофизических свойств и требуемой толщины теплоизоляции [25]

Материал стены	Коэф. теплопроводности, (Вт/м·К)	Требуемая толщина, мм
Пенополистирол ППС-20	0,042	124
Минеральная вата Rockwool Façade Batts	0,046	135
Клееный деревянный брус или дерево массив (сосна и ель поперек волокон) 500 кг/м <sup>3</sup>	0,18	530
Кладка на теплоизоляционный клей керамических блоков ПОРОТЕРМ	0,17	575*
Кладка на клей из газо (пенно-) бетонных блоков 400 кг/м <sup>3</sup>	0,18	610*
Кладка на клей из полистирол-бетонных блоков 500 кг/м <sup>3</sup>	0,19	643*
Кладка на клей из газо (пенно-) бетонных блоков 600 кг/м <sup>3</sup>	0,29	981*
Кладка на клей из керамзитбетонных блоков на керамзитовом песке и керамзитопенобетон 800 кг/м <sup>3</sup>	0,31	1049*
Кладка из керамического пустотного кирпича плотностью 1000 кг/м <sup>3</sup> (брутто) на цементно-песчаном растворе	0,52	1530
Кладка из глиняного обыкновенного кирпича на цементно-песчаном растворе	0,76	2236
Кладка из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе	0,87	2560
Железобетон	2,04	6002

\* с добавлением коэффициента неоднородности 1,5 на теплотопери необходимых в конструкции зданий монолитных поясов и несущих перемычек из тяжелых бетонов.

Германии, где экологичность и энергоэффективность – обязательные характеристики строительства и ремонта, популярно строить энергопассивные дома, где основным утеплителем является пенополистирол [25, 49]. Поэтому доля потребления вспененного полистирола в Германии достигает 4 кг на человека, в то время как в России не доходит даже до 1 кг [49, 53].

Насколько эффективен пенополистирол, если он так популярен за рубежом? Разберемся с его теплофизическими особенностями. К основным теплофизическим свойствам ППС относят:

- теплостойкость;
- удельную теплоёмкость;
- теплопроводность.

Одним из основных свойств пенополистирола является его теплостойкость. Критерием теплостойкости [57] материала служит его формоустойчивость, характеризующая поведение материала при повышенных температурах. Условно за характеристику теплостойкости пенополистирола принимают температуру, при которой линейная усадка материала не превышает 1%.

Периодическое нагревание образцов пенопласта при температуре ниже  $-60^{\circ}\text{C}$  слабо отражается на их формоустойчивости, развивающиеся деформации невелики и носят затухающий характер. Периодическое нагревание-охлаждение от  $+50$  до  $-50^{\circ}\text{C}$  после 50 циклов выявили высокую стабильность температурной усадки у разных видов пенополистирола: 0,31 ... 0,35% – ПСБ-С; 0,30 ... 0,33% – ПСБ; 0,06 – ПС-1; 0,28 – ПС-4 [57].

Теплостойкость определяется объемной усадкой пенополистирола при кратковременном ( $60-200^{\circ}\text{C}$ ) или длительном ( $70-90^{\circ}\text{C}$ ) воздействии повышенной температуры на материал, и определяется по формуле [38]:

$$D = \frac{v_0 - v}{v_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $v_0$  – первоначальный объем пенополистирола,  $\text{см}^3$ ,

$v$  – объем пенополистирола после тепловой обработки,  $\text{см}^3$ .

На теплостойкость пенополистирола и его рабочую температуру влияет природа газообразователя. Теплостойкость не зависит от кажущейся плотности [57]. Применение для получения пенопластов хлорпроизводных стирола позволяет повысить их теплостойкость на  $20 \dots 30^{\circ}\text{C}$ . Введение в рецептуру пенопластов фосфорсодержащих соединений с целью придания материалу свойства самозатухаемости, наоборот, снижает её.

Результаты циклических испытаний беспрессового пенополистирола с антипиреновыми добавками ППС (охлаждение до  $-30^{\circ}\text{C}$  и нагревание до  $+50^{\circ}\text{C}$ ) показали, что в этом случае происходит линейная усадка пенополистирола. Изменение линейных размеров образцов характеризуется коэффициентом линейного термического расширения  $\alpha$ ,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ . С увеличением

температуры коэффициент  $\alpha$  уменьшается (формула 2). С увеличением числа циклов испытаний (нагревание – охлаждение) в интервале температур  $0 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$  линейная усадка увеличивается,  $\alpha$  уменьшается.

Снижение формоустойчивости ППС при повышенных температурах затрудняет определение коэффициента  $\alpha$ , поэтому его значение носит приближенный характер. Приближенное значение  $\alpha$  рассчитывают по формуле [38]:

$$\alpha = \frac{1}{l} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T}, \quad (2)$$

где  $l$  – начальная длина образца, мм,

$\Delta l$  – деформация образца (мм) при температуре, равной  $\Delta T$ .

Теплоемкостью называют количество теплоты, которое необходимо сообщить телу, чтобы повысить температуру какой-либо количественной единицы на 1 градус [56]. В зависимости от выбранной количественной единицы вещества различают:

- молярную теплоемкость  $\mu c$ , кДж/(кмоль·К);
- удельную теплоемкость  $c$ , кДж/(кг·К);
- объемную теплоемкость  $c'$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К).

Объемная и массовая теплоемкости связаны между собой следующими соотношениями:

$$c' = c \cdot \rho_n, \quad (3)$$

$$c = \frac{\mu c}{\mu}, \quad (4)$$

где  $\rho_n$  – плотность материала при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>,

$\mu$  – масса вещества, кг.

Так же каждый вид теплоемкости делится на показатели при постоянном давлении ( $\mu c_p$ ,  $c'_p$ ,  $c_p$ ) и постоянном объеме ( $\mu c_v$ ,  $c'_v$ ,  $c_v$ ). Такие величины теплоемкости связаны между собой следующим отношением:



$$c_p - c_v = V \cdot T \cdot \alpha^2 / \beta, \quad (5)$$

где  $V$  – объем 1 г полимера;

$T$  – абсолютная температура;

$\alpha$  – объемный коэффициент термического расширения;

$\beta$  – сжимаемость при атмосферном давлении.

У полимерных материалов разность  $c_p - c_v$  очень мала, поэтому ею можно пренебречь [56]. Удельная теплоемкость пенополистирола также зависит от природы газообразователя и не зависят от кажущейся плотности [57].

Теплоемкость, определяемая соотношением элементарного количества теплоты, сообщаемой термодинамической системе к бесконечно малой разности температур [56]:

$$C = \frac{dQ}{dT}, \quad (6)$$

где  $Q$  – количество теплоты,

$T$  – температура в Кельвинах.

Теплопроводность материала зависит от химического состава, а так же количества, размера и расположения пор и характеризуется коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К). Теплопроводность пенополистирола снижается с уменьшением кажущейся плотности (см. рисунок 3, а) [38, 57].

Ячеистая структура определяющим образом влияет на теплопроводность пенополистирола. В связи с наличием ячеистой структуры передача тепла обуславливается теплопроводностью полимерных плёнок, конвекцией газообразной фазы и излучением между стенками ячеек, т.е. теплопроводность пенополистирола характеризуется эффективным коэффициентом теплопроводности. Основной вклад в коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ) вносит газовая фаза, так как объёмное содержание её, например, у лёгких пенопластов достигает 97% [57]. Поэтому, чем меньше плотность ППС, тем больший объем занимает газовая фаза в ячейках, и, следовательно, тем меньше

теплопроводность ППС. Однако существует оптимальное значение плотности ( $\rho = 20 \dots 40 \text{ кг/м}^3$ ), выше и ниже которого коэффициент теплопроводности увеличивается.

Увеличение влажности пенополистирола приводит к возрастанию теплопроводности (см. рисунок 3, б). Увлажнение на 1% повышает коэффициент теплопроводности на 4%. При увлажнении до 4% беспрессового ППС коэффициент теплопроводности резко возрастает, а затем изменяется незначительно.

Коэффициент теплопроводности возрастает с повышением температуры (см. рисунок 3, в). У вспененного ППС до 30 °С он практически не изменяется, при 30 ... 40 °С плавно увеличивается на 8%, а после 40 °С резко возрастает [57].

Передача тепла происходит от мест с большей температурой к местам с меньшей температурой. Основной закон теплопроводности – закон Фурье: плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$\vec{q} = -\lambda \text{ grad } T = -a \text{ grad } H, \quad (7)$$

где  $H$  – энтальпия единицы объема,

$a$  – коэффициент температуропроводности,

$\rho$  – плотность.

Между теплофизическими параметрами существует соотношение:

$$\lambda = c_v a \rho. \quad (8)$$

Поэтому, зная коэффициент теплопроводности и удельную теплоемкость, можно найти коэффициент линейного термического расширения при заданной температуре [38, 56].

Теплофизические характеристики беспрессового пенополистирола с антипиреновыми добавками (ППС) и, для сравнения, пенополистирола других видов приведены в таблице 2.

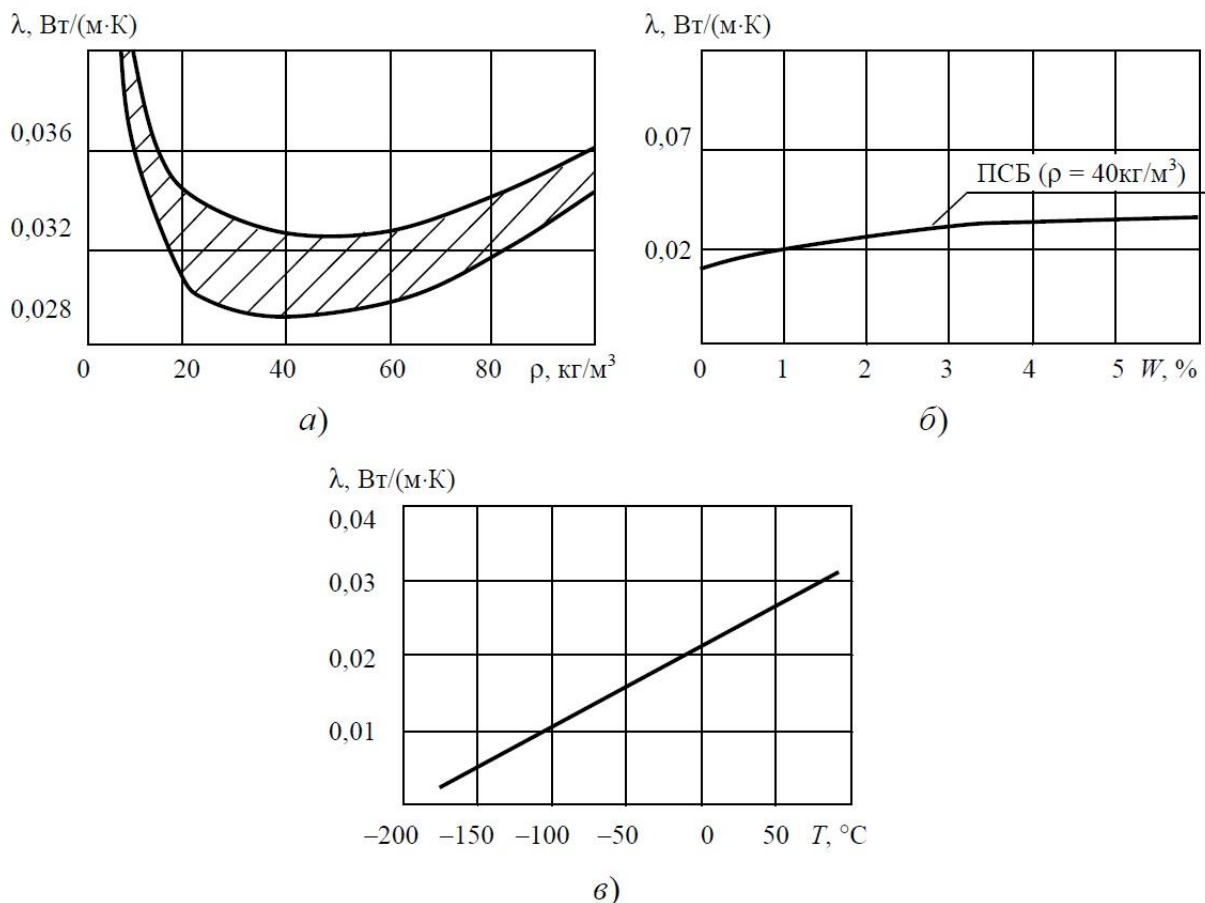


Рисунок 3 – Зависимости коэффициента теплопроводности пенополистирола от кажущейся плотности (а); влажности (б) и температуры (в) [57]

Таблица 2 – Теплофизические характеристики различных марок пенополистирола [57]

Тип ППС	Кажущаяся плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэф. теплопроводности $\lambda$ при 20°C, Вт/(м·град)	Коэф. линейного термического расширения $\alpha \times 10^6$ , °C <sup>-1</sup>	Удельная теплоемкость $c$ при 20°C, 10 <sup>3</sup> ·Дж/(кг·°C)
ПС-1	60 ... 220	0,032 ... 0,052	52 ... 71	–
ПС-4	30 ... 60	0,029 ... 0,044	62 ... 84	–
ПСБ	20 ... 60	0,028 ... 0,038	56 ... 68	1,47 ... 1,63
ППС	20 ... 60	0,028 ... 0,038	55 ... 65	–

Как видно из таблицы 2, беспрессовый пенополистирол имеет наименьшие коэффициенты теплопроводности и линейного термического расширения, чем прессовый пенополистирол. Как рассматривалось выше, это зависит от химического состава пенополистирола, его кажущейся плотности. И, тем не менее, пенополистирол применяется разной плотности и остается популярным материалом.

### 1.3 Требования нормативной документации по пенополистиролу

Пенополистирол продолжает завоевывать рынок теплоизоляционных материалов. Согласно американской исследовательской компании SMAI спрос на пенополистирол на мировом рынке достигает 4 млн. тонн [47]. В России применение ППС в 2017 году составляет 20–22% и занимает второе место на российском рынке теплоизоляционных материалов. За последние несколько лет произошел небольшой спад спроса на ППС в связи с распространением информации в СМИ, что ППС является пожароопасным материалом [10, 36]. Производители пенополистирола продолжают рекламировать материал, преуменьшая его пожароопасные свойства, что вводит в заблуждение и строителей, и покупателей [40]. Но уже прогнозируется, что в ближайшее время произойдет увеличение спроса на полимерные теплоизоляционные материалы [45].

Пожароопасность пенополистирола не слухи. Несмотря на положительные качества плит ППС (их физические и теплофизические свойства, технологичность) с точки зрения пожарной безопасности они опасны: являются пожароопасным, легковоспламеняемым материалом, выделяющим токсичные вещества при горении [54]. Его пожарно-технические показатели и область применения отражены и регламентированы в нормативной и технической документации.

Основным стандартом для плит ППС является ГОСТ 15588-2014 [14], который введен взамен ГОСТ 15588-86 [15] и вступил в силу с 2015 года. Сопоставление ГОСТов [6, 15] выявили существенные различия в следующих требованиях, представленные в таблице 3.

Классификация плит основывается на плотности плит. Ранее диапазон градации по плотности был  $10 \text{ кг/м}^3$ , и поэтому в одной марке были изделия с совершенно разными прочностными и теплотехническими показателями (см. таблицу 4) [40]. В новом ГОСТе в каждой марке плит должно быть

обязательное наличие антипиреновых добавок и должна быть фиксированная плотность (см. таблицу 5).

Таблица 3 – Отличия в области применения ППС

Наименование	ГОСТ 15588-86	ГОСТ 15588-2014 (с 01.07.2015 г.)
1. Область применения	Предназначаются для тепловой изоляции в качестве среднего слоя строительных ограждающих конструкций и промышленного оборудования	Предназначены: <ul style="list-style-type: none"> <li>• для тепловой изоляции наружных ограждающих конструкций;</li> <li>• тепловой защиты отдельных элементов строительных конструкций и промышленного оборудования при отсутствии контакта плит с внутренними помещениями;</li> <li>• в холодильных камерах;</li> <li>• могут применяться для теплоизоляции в фасадных теплоизоляционных композиционных системах с наружными штукатурными слоями»</li> </ul>
2. Требования безопасности	П.4.13. Определение времени самостоятельного горения	<ul style="list-style-type: none"> <li>• «п.6.5. ... Пожарно-технические показатели проверяют в соответствии с действующими требованиями пожарной безопасности Г, В, Т, Д»;</li> <li>• «п.7.10 Определение времени самостоятельного горения».</li> </ul>
3. Классификация и маркировка плит из ППС	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1.1.Плиты в зависимости от наличия антипирена изготавливают двух типов: ПСБ-С – с антипиреном, ПСБ – без антипирена.</li> <li>• Классификация плит основывалась на диапазоне плотности продукции, табл.4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Обязательное наличие в составе строительных теплоизоляционных плит антипиреновых добавок.</li> <li>• 20 марок с жесткой фиксацией плотности, табл.5</li> </ul>

Таблица 4 – Маркировка плит ППС по ГОСТ 15588-86 [15]

Наименование показателя	Норма для плит марок							
	высшей категории качества				первой категории качества			
	15	25	35	50	15	25	35	50
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	До 15	15,1... 25,0	25,1... 35,0	35,1...50,0	До 15	15,1...25,0	25,1...35,0	35,1...50,0

Таблица 5 – Маркировка плит ППС в зависимости от плотности по ГОСТ 15588-2014 [14]

Наименование показателя	Значение показателя для плит марки										
	ППС10	ППС12	ППС13	ППС14	ППС16Ф	ППС17	ППС20	ППС23	ППС25	ППС30	ППС35
Плотность, кг/м <sup>3</sup> , не менее	10	12	13	14	16	17	20	23	25	30	35

Анализ норм по определению и методикам проверки пожарно-технических показателей (ПТП) для твердых горючих строительных материалов в соответствии с нормативными требованиями пожарной безопасности [14] выявил одинаковость оценочных требований по следующим группам: Г (группа горючести), В (группа воспламеняемости), Т (группа по токсичности продуктов горения), Д (группа дымообразующей способности). Но по показателю «стойкость к горению» выявил следующие отличия:

- по наименованию показателя, таблица 6, а именно – время самостоятельного горения, а не группа распространения пламени;
- по времени нахождения испытуемого образца в пламени, таблица 6;
- по месту испытания – в пламени горелки, находящейся в помещении, а не в специальной испытательной камере.

По-видимому такие нормативные требования вызваны особенностью строения пенополистирола, отличающегося от обычных твердых материалов, т. к. основной объем в нем занимает газ (соотношение С : Н  $\approx$  1 : 1) [40].

Таблица 6 – Определение пожарно-технических показателей для пенополистирола

Пожарно-технические показатели по ГОСТ 12.1.044-89*	Нормативный документ	
	Плиты ППС	Твердые горючие строительные материалы
Стойкость к горению – оценка способности материала воспламеняться, выделять тепло и распространять пламя по поверхности при воздействии внешнего теплового потока	по ГОСТ 15588-2014	ГОСТ 30444-97
	Время самостоятельного горения	Группа распространения пламени
	после 4 с нахождения образца в пламени горелки	после 10 мин нахождения образца в специальной камере в пламени горелки

Анализ установленных классов в группах ПТП проводился по сертификатам пожарной безопасности предприятий, выпускающих плиты из ППС [50–52], а также по оценкам российских экспертных исследований [5, 29, 30, 33, 37, 48, 58], таблица 7. Сопоставление данных выявило завышенность оценок у производителей.

Таблица 7 – Оценки пожарно-технических показателей плит ППС

ППС беспрессовый	Пожарно-технический показатель			
	Г (горючие)	В (воспламеняемые)	Т (токсически опасные)	Д (дымообразующая способность)
Данные производителей	Г2 – умеренно Г3 – нормально Г4 – сильно	В2 – умеренно В3 – легко	Т2 – умеренно; Т3 – высокоопасные	Д3 – высокая
Данные исследователей	только Г4 – сильно	только В3 – легко	Т3 – высокоопасные Т4 – чрезвычайно	Д3 – высокая

Следовательно, учитывая высокий спрос на этот материал при строительстве зданий, остаются актуальными задачи по разработке дополнительных защитных мер при его применении, а также по разработке возможных способов снижения пожароопасных свойств этого материала.

#### 1.4 Исследование пожароопасных свойств пенополистирола

Ранее, были проведены экспериментальные исследования [9, 27, 32, 59] по возможности снижения горючести, плавления и дымообразования образцов беспрессового ППС плотностью 20 кг/м<sup>3</sup> методом нанесения огнезащитных покрытий. В ходе которых установилось, что пенополистирол без покрытия, действительно материал пожароопасный, обладает высокой степенью горючести (группа Г4 – сильногорючие материалы), воспламеняемости (В3), дымообразования (Д3) [39]. При горении пенополистирол активно плавится (см. рисунок 4), растекается через образующиеся неплотности конструкций, что приводит к возникновению новых очагов горения [9, 27, 32, 54, 59]. Процесс горения ППС происходит в трех фазах: твердой, жидкой и газообразной. Это и делает его отличным от других твердых теплоизоляционных материалов [26].

Обработанные образцы ППС показали другой результат. И для начала был проведен выбор метода снижения горючести ППС.



Рисунок 4 – Плавление пенополистирола при горении

Так как пенополистирол относится к полимерным материалам, то для него существуют следующие методы снижения горючести:

- синтез негорючих полимеров;
- химическая модификация полимеров;
- применение антипиренов;
- применение наполнителей;
- нанесение огнезащитных покрытий;
- комбинация различных способов получения материалов пониженной

горючести, диктуемая соображениями целевого назначения материала, требованиями в отношении его технических и технологических показателей, стоимости и т.д.

О данных методах подробнее расписано в моей предыдущей исследовательской работе [25]. Наиболее простым и эффективным является метод снижения горючести нанесением огнезащитных покрытий. Существует два способа нанесения покрытия – поверхностный и объемный. Поверхностный способ нанесения может осуществляться при помощи молярной кисти или



краскопульта, объемный – при помощи автоклава. При этом огнезащитными покрытиями должны быть трудновоспламеняемые и негорючие вещества.

При проведении патентного поиска в период с 1987–2015 гг. [25], выяснилось, что при выделенных группах огнезащитных средств (см. рисунок 5) наибольшее предложение выявили неорганические огнезащитные средства.

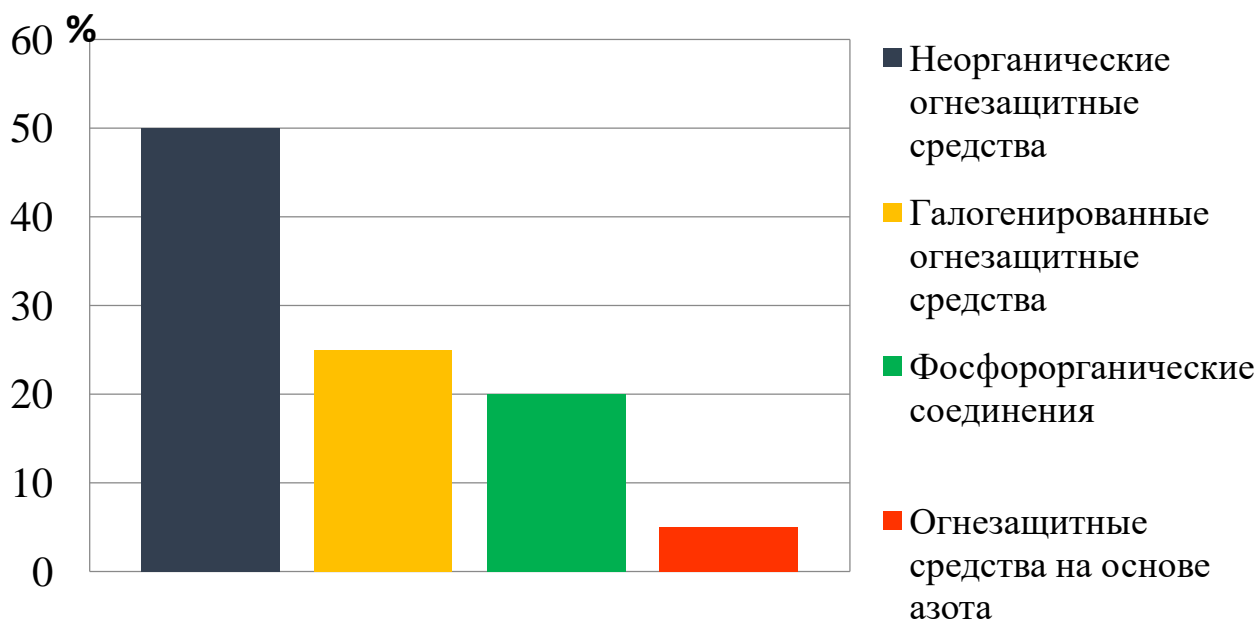


Рисунок 5 – Патентный поиск по огнезащитным средствам [25]

Поэтому в качестве огнезащитных веществ были выбраны такие растворы, как жидкое стекло, ортофосфорная кислота, натрий кремнефтористый [8, 25, 31]. Эти вещества были выбраны из-за их широкого применения как жаропрочных, жаростойких связующих при изготовлении материалов, цементов, красок, пропиток. В качестве добавок к ним: полисорб, побелка садовая, оксид магния. Кроме того, базовые вещества разбавлялись водой в целях экономии огнезащитных веществ.

Образцы ППС-20 были подготовлены по требованиям п.7.10.3 ГОСТ 15588-2014 [14]. Затем образцы покрывались огнезащитными составами, которые подробнее описаны в прошлой исследовательской работе [25], сушились при комнатной температуре в течение 24 часов, затем сжигались в пламени спиртовой горелки в течение 10 с. Для оценки выгорания образцов был

использован количественный показатель степени выгорания образцов ( $\sigma$ , %). Сравнение степени выгорания исходного образца и некоторых образцов обработанного огнезащитными составами ППС представлены на рисунке 6 [24]. Результаты сжиганий представлены в таблице 8.

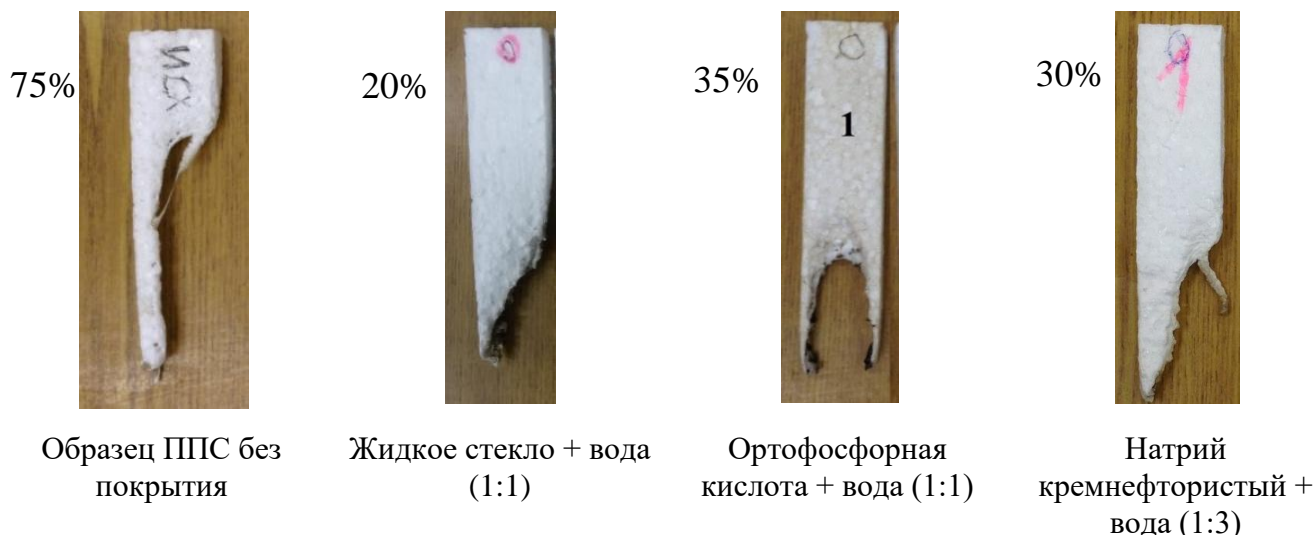


Рисунок 6 – Степень выгорания обработанных и необработанных образцов ППС

Также проводилась оценка опасности дымообразования по контролю: фенола, формальдегида и сажи. Выбор данных веществ определялся особенностью процесса горения пенополистирола: деструкцию твердой фазы характеризует фенол, окисление жидкой и газообразной фазы – формальдегид, а сажа характеризует полноту сгорания материала [43] (см. рисунок 7 и таблицу 8).

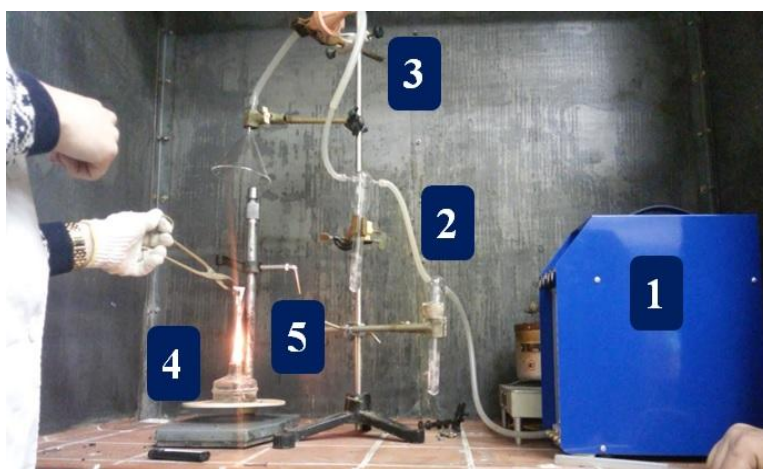


Рисунок 7 – Лабораторная установка:  
 1 – газоанализатор ИРА-10; 2 – сосуды Зайцева;  
 3 – держатель с фильтрами; 4 – спиртовая горелка; 5 – образец

Таблица 8 – Комплексная оценка эффективности покрытий

Состав раствора/ (способ обработки)	Оценка выгорания образца		Оценка опасности дымообразования		
			Концентрация в выбрасываемом воздухе, мг/м <sup>3</sup>		Цвет фильтра + черный; ± серо- черный; - серый
	σ, %	Налич ие плава	Фенол	Формальдегид	
	1	2	3	4	
ЖС+H <sub>2</sub> O +полисорб (автоклав)	10	±	1,01	0,55	+
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O + CaCO <sub>3</sub> (поверхностный)	10	–	0,57	0,23	–
ЖС+H <sub>2</sub> O (поверхностный)	20	±	0,58	0,40	+
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O + полисорб (поверхностный)	30	±	0,93	0,44	+
Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> +H <sub>2</sub> O (25%+75%) (поверхностный)	30	+	0,53	0,37	±
Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> +H <sub>2</sub> O (5%+95%) (поверхностный)	40	++	0,33	0,35	±
Исходный образец	75	+++	0,14	0,17	+

Имея разное применение, в ходе исследований базовые композиции выявили разные физические свойства, как импрегнат ППС (см. рисунок 6):

- композиции на основе водного раствора жидкого стекла создают негорючую пленку, которая ограничивает доступ кислорода к ППС;
- композиции на основе водного раствора ортофосфорной кислоты – тормозят физико-химические реакции, увеличивая время сгорания ППС;
- композиции на основе натрия кремнефтористого – уменьшают скорость горения ППС.

Таким образом, экспериментально установлено, что возможно применять неорганические огнезащитные покрытия для пенополистирола, а также с помощью нанесения этих покрытий улучшить пожарно-технические показатели пенополистирола [9, 27, 32, 59].

## ВЫВОДЫ ПО 1 ГЛАВЕ:

1) Пенополистирол – широкоиспользуемый в строительстве теплоизоляционный материал. Благодаря своему химическому строению, он легкий, прочный, водонепроницаемый, прост в обработке и имеет низкий коэффициент теплопроводности. Поэтому ППС остается популярным на мировом рынке.

2) Пожарно-технические показатели и область применения пенополистирола отражены в основном стандарте ГОСТ 15588-2014 [14].

3) Пенополистирол, материал пожароопасный, обладает высокой степенью горючести, воспламеняемости, дымообразования. При горении ППС активно плавится.

4) Анализ нормативных документов показал, что, несмотря на существенное усиление требований безопасности с 2016 года к горючему строительному материалу пенополистиролу, остаются неоднозначности требований, по оценке его пожарно-технических показателей.

5) Существуют эффективные методы снижения пожароопасных свойств пенополистирола. Одним из них является метод нанесения огнезащитных покрытий на основе веществ неорганического происхождения. Как они влияют на теплофизические свойства ППС еще не известно. Поэтому исследование влияния огнезащитных покрытий на теплофизические свойства пенополистирола является актуальной задачей.

## 2 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Одним из основных направлений использования ППС – малоэтажное строительство [49]. Данное исследование охватывает применение пенополистирола в малоэтажном строительстве домов эконом-класса и быстровозводимые конструкции: дачные дома, коттеджи, небольшие павильоны и т.п.

В России строительство домов эконом-класса и быстровозводимых конструкций популярно [34]. Люди занимаются садоводством, а значит, строят дачи, строят коттеджи, в городах можно увидеть небольшие торговые павильоны, магазины, склады, которые строят из сэндвич-панелей с использованием пенополистирола.

Данное исследование направлено для дальнейшего использования пенополистирола при строительстве малоэтажных зданий, частных построек, поэтому метод снижения горючести ППС и способ нанесения покрытий должны быть простыми в исполнении, а материалы для приготовления огнезащитных растворов – в легкой доступности на рынке.

Поэтому был выбран проверенный метод снижения горючести пенополистирола – поверхностное нанесение огнезащитных покрытий [9, 27, 32, 59]. Вышерассмотренный патентный поиск выявил наибольшее предложение по неорганическим огнезащитным веществам.

Экспериментальная часть по подбору огнезащитных составов заключается в следующих этапах:

- 1) Подбор и подготовка огнезащитных составов.
- 2) Нанесение на поверхность образцов ППС плотностью  $20 \text{ кг/м}^3$  и  $28 \text{ кг/м}^3$  подготовленных составов и композиций.
- 3) Сушка образцов при комнатной температуре ( $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ) в течение суток.
- 4) Оценка адгезионных свойств покрытий (качество прилипания покрытия) – степени сцепления с поверхностью ППС.
- 5) Огневое испытание образцов.

б) Оценка результатов огневых испытаний: визуальная оценка устойчивости покрытия при огневом испытании, оценка степени выгорания и наличия плавления у образцов ППС.

7) Анализ полученных результатов.

## 2.1 Подбор огнезащитных составов

Следуя цели исследования и патентного поиска, выбирались соответствующие строительные материалы, в приоритете имеющие теплостойкость, а также вещества из предыдущих наших исследований [8, 25, 31].

В качестве базового вещества было выбрано жидкое натриевое стекло (см. рисунок 8) как компонент, обладающий клейкостью и вязкостью, для лучшего прилипания покрытия к поверхности ППС. В ходе экспериментальных исследований [9, 26, 27, 32, 49, 59] было установлено, что водный раствор жидкого стекла создает на поверхности ППС негорючую пленку, которая ограничивает доступ кислорода, а также понижает горючесть защищаемого образца.

Жидкое стекло натриевое ( $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ ) по ГОСТ 13078-81 [12] представляет собой водный щелочной раствор силикатов натрия; применяют для изготовления жаропрочных, химически стойких материалов, а также для склеивания и связки строительных материалов. Имеют низкую стоимость, безопасны и не ухудшают окружающую среду в процессе эксплуатации [55].



Рисунок 8 – Базовое вещество: жидкое стекло

Для замедления скорости распространения пламени по поверхности образца ППС в базовый состав дополнительно вводились добавки негорючих веществ, имеющие жаропрочные и жаростойкие свойства (см. таблицу 9, рисунок 9). Добавки легко можно найти в строительных магазинах по доступной цене.

Таблица 9 – Негорючие вещества-добавки [42]

Наименование	Применение в строительстве	Состав
1. Шпаклевка финишная белая полимерная «Ветонит»	Финишное выравнивание стен и потолков, пластичная и белая, идеальное сведение слоев.	Известняк, полимерный клей
2. Пескобетон М200	Универсальный недорогой материал, используется в строительных и монтажных работах – изготовление фундаментов, стяжка для пола, и т.д.	Мелкозернистый плотный заполнитель – кварцевый песок и портландцемент
3. Смесь кладочная глино-шамотная жаростойкая «Терракот»	Экологически чистая, высокопластичная смесь для кладки кирпичей в топочных и иных горячих зонах нагреваемых объектов. Обладает высокой силой сцепления (адгезией) с поверхностью.	Глина каолиновая высшей очистки, шамот каолиновый, песок
4. Смесь штукатурная высокопрочная жаростойкая «Терракот»	Экологически чистая, высокопластичная смесь; обладает высокой силой сцепления (адгезией) с поверхностью.	Глина каолиновая, пыль шамотная каолиновая, связующее жаростойкое
5. Огнеупорная кладочная смесь	Стойкая к высоким температурам до 1600 °С и выше, используется как раствор для кладочных работ.	Порошок огнеупорной глины, песок для строительных работ, песок формовочный
6. Побелка садовая «Гарантсервис»	Негорючий порошок, для побелки стволов садовых деревьев от вредителей и солнечных ожогов.	Известь, медный купорос
7. Финишная шпатлевка латексная «Лакра»	На основе водной дисперсии акрилового сополимера (латекса), имеет высокую адгезию к основанию и малую усадку.	Дисперсия акрилового, микрорамор, пластификатор, функциональные добавки
8. Глина для лепки	Экологичный продукт, безопасный, не содержит химических добавок.	Кембрийская глина Чекаловского месторождения Ленинградской области.
9. Глина каолиновая	Высокая огнеупорность, низкая пластичность и связующая способность. Используют для производства шамота, огнеупорного кирпича, и т.д.	Глина с каолинового карьера недалеко от г. Кыштым Челябинской обл.



Рисунок 9 – Огнезащитные негорючие вещества-добавки

Для поддержания нужной консистенции, а также в целях экономии базового вещества, жидкое стекло разбавляется водой в отношении 1:1. Базовое вещество с добавками берутся в следующем соотношении (см. таблицу 9).

Таблица 9 – Композиционные составы

Добавки	Жидкое стекло + вода + добавка, % масс.
1. Ветонит	25 + 25 + 50
2. Пескобетон М200	30 + 30 + 40
3. Смесью кладочная	30 + 30 + 40
4. Смесью штукатурная	30 + 30 + 40
5. Смесью огнеупорная	35 + 35 + 30
6. Побелка садовая	30 + 30 + 40
7. Шпатлевка латексная	30 + 30 + 40
8. Глина для лепки	35 + 35 + 30
9. Глина каолиновая	35 + 35 + 30
10. Без добавок	50 + 50



Количество воды в базовом растворе огнезащитных составов составляет 50% потому, что при смешивании жидкого стекла с водой происходит гидролиз и образуется щелочной раствор, и при низком содержании воды pH раствора будет около 13, что нежелательно получать в связи с постепенным разрушением поверхностной корки ППС под влиянием щелочи. При более высоком содержании воды – раствор потеряет необходимые огнезащитные свойства. Добавки вводились исходя из густоты раствора – добавлялись до состояния жидкой сметаны.

Не все составы получаются однородными, и при нанесении на каждый образец пенополистирола следует предварительно размешивать раствор.

## 2.2 Обработка огнезащитными составами образцов пенополистирола

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории «Пожаровзрывобезопасность» кафедры «Безопасность жизнедеятельности» ЮУрГУ на образцах беспреессового самозатухающего пенополистирола плотностью 20 кг/м<sup>3</sup> и 28 кг/м<sup>3</sup>, как одного из самых широко используемых теплоизоляционных материалов. Для испытаний использовали образцы размерами (140x30x10)±1 мм в соответствии с ГОСТ 15588-2014 [14].

Метод огнезащитных покрытий подразумевает обработку образцов поверхностным способом с помощью малярной кисти, краскопульту или окунанием в раствор; или объемным способом в автоклаве. Был выбран поверхностный способ нанесения покрытий, так как он удобнее в обработке, наиболее экономичен и менее материалозатратен.

Для разведения растворов и покрытия образцов использовалось следующее лабораторное оборудование:

- мерный стакан 50 мл;
- столовая ложка;
- весы электронные 2-го класса точности с погрешностью ±0,01 г;
- малярная кисть.

Нанесение огнезащитных растворов на пенополистирол осуществляется малярной кистью при комнатной температуре. Затем пенополистирол сушится в горизонтальном положении при комнатной температуре в течение 24 часов (см. рисунок 10). Результаты покрытий представлены на рисунке 11.



Рисунок 10 – Процесс нанесения покрытий и сушка обработанных образцов ППС

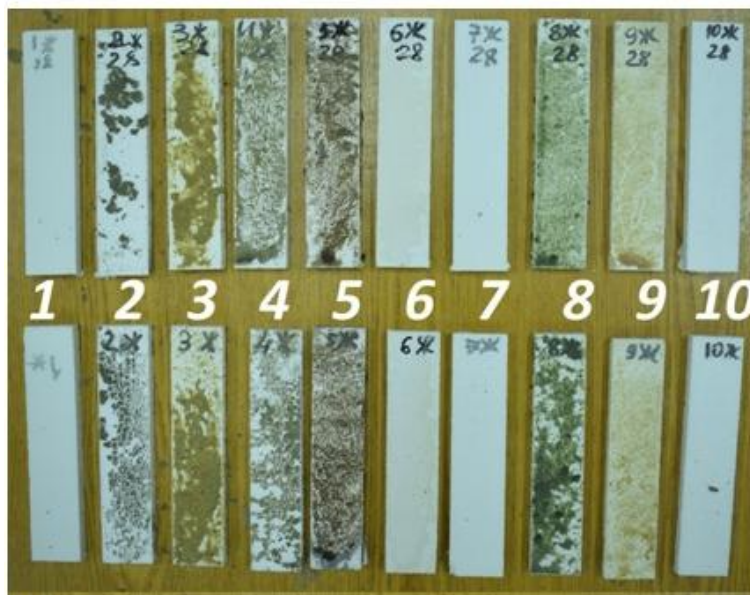


Рисунок 11 – Образцы ППС, покрытые огнезащитными составами

Для оценки эффективности огнезащитных составов для пенополистирола, необходимо исследовать адгезию покрытий и горючесть обработанного ППС.

### 2.3 Подбор метода оценки адгезионных свойств покрытий

Адгезия – явление взаимодействия механической прочности на границе раздела между твердой поверхностью и другими материалами за счет молекулярных сил. Помимо термина «адгезия» существует еще «когезия». Когезия – это внутренние силы, которые связывают покрытие в одно целое [21]. Для нашего исследования будет достаточно проверить только адгезию покрытий.

Адгезия может рассматриваться на стыке различных областей наук: физической химии и химии высокомолекулярных соединений, физики твердого тела, классической механики, физико-химической механики, математической статистики и др. Рассмотрим адгезию в аспекте физической химии поверхностных явлений [7].

Количественной характеристикой адгезии является работа адгезии. Качественной характеристикой – адгезионная прочность, – сила, необходимая для разрушения адгезионного соединения.

Причиной адгезии является молекулярное притяжение контактирующих фаз или их химическое взаимодействие. Явление адгезии лежит в основе образования прочного контакта (склеивания) между твердым телом – субстратом и клеящим агентом – адгезивом, являющимися основными компонентами адгезионного соединения. В данном случае, ППС является субстратом, а огнезащитное покрытие – адгезивом. Площадь фактического контакта определяется смачиванием жидким адгезивом поверхности субстрата и термодинамической совместимостью адгезива и полимерного субстрата.

По адгезионной прочности судят об адгезии. Адгезионная прочность – это сила, необходимая для разрушения адгезионного соединения, отнесенная к площади адгезионного контакта [7], очень чувствительна к размеру экспериментальных образцов. Данные исследования не будут глубоко затрагивать теорию адгезии, остановимся на методах проверки адгезии.

Существуют следующие методы проверки адгезии:

- метод отрыва;
- метод отслаивания;
- метод параллельных надрезов;
- метод решетчатых надрезов;
- метод Х-образного надреза.

Стандартов по методам определения адгезии огнезащитных покрытий пенополистирола не существует, поэтому будут рассматриваться методы определения адгезии по лакокрасочным покрытиям.

**Метод отрыва.** Определяется по ГОСТ 32299-2013 [20]. Сущность метода заключается в нанесении испытуемого материала на пластинки для испытаний одинаковой толщины и текстуры поверхности. Цилиндрические заготовки приклеивают непосредственно к поверхности покрытия с помощью клея. Склеенные образцы после затвердевания клея (высыхания или отверждения) испытывают на отрыв (растяжение), измеряя усилие, необходимое для отрыва покрытия от покрытой поверхности. Результатом испытания является усилие отрыва, необходимое для нарушения адгезии или когезии в испытуемом покрытии. Возможно также смешанное разрушение адгезия/когезия.

Толщина покрытия измеряется в микрометрах и может быть любой.

**Метод отслаивания.** Осуществляется по ГОСТ 15140-78 [13]. Сущность метода заключается в определении адгезии отслаиванием гибкой пластинки от армированного стеклотканью покрытия и измерении необходимого для этого усилия. Основной аппаратурой для измерений являются:

Опыты проводятся с нанесением покрытий на алюминиевую фольгу толщиной 0,05 мм марок АД1 и АД0. Толщина покрытия после сушки должна быть не менее 70 мкм.

**Метод решетчатых надрезов** по ГОСТ 31149-2014 [18]. Позволяет определить адгезию (устойчивости к отслаиванию) однослойного, многослойного покрытий и системы покрытий к окрашиваемой поверхности и/или между слоями

при решетчатом надрезе (прямоугольная решетка). Надрез должен доходить до обрабатываемой поверхности. Метод предназначен для покрытий, нанесенных на твердые (например, металл) и мягкие (например, древесина, штукатурка) поверхности. Метод не применим при толщине покрытия более 250 мкм и для текстурированных (шероховатых) покрытий. Оценивает адгезию по шестибальной классификации.

**Метод параллельных надрезов.** Осуществляется по ГОСТ 15140-78 [13]. Сущность метода заключается в нанесении на готовое огнезащитное покрытие параллельных надрезов и визуальной оценке состояния покрытия по трехбальной системе. Толщина слоя не должна превышать 200 мкм.

**Метод Х-образного надреза** по ГОСТ 32702.2-2014 [21]. Сопротивление систем защитных покрытий адгезионному или когезионному разрушению оценивают по качеству, используя шкалу от 0 до 5 баллов (от минимального до максимального разрушения). Метод Х-образного надреза может быть использован на покрытиях любой толщины и может быть использован для твердых покрытий. В данном методе прорезают покрытие до окрашиваемой поверхности, используя хорошо наточенный режущий инструмент.

Рассмотрев все вышеприведенные методы определения адгезии, можно сразу отказаться от метода отслаивания, потому что этот метод применим только для лакокрасочных материалов, испытание которых должно проходить на стеклоткани, а не на пенополистироле, что важно.

Поэтому для начала необходимо измерить толщину огнезащитных покрытий на пенополистироле. Для этого в соответствии с ГОСТ 31993-2013 [19] с помощью микрометра с пределами измерений длины от 0 до 10 мм (см. рисунок 12) замеряем общую толщину покрытия с образцом ППС, вычитаем толщину пенополистирола и делим оставшуюся часть пополам, так как ППС обработан с двух сторон по измеряемой толщине (см. таблицу 10).



Рисунок 12 – Измерение толщины покрытия с помощью микрометра

Таблица 10 – Толщина различных огнезащитных покрытий на образцах ППС плотностью 20 и 28 кг/м<sup>3</sup>

Жидкое стекло + вода + добавка	Толщина покрытия, мкм			
	20 кг/м <sup>3</sup>		28 кг/м <sup>3</sup>	
Добавки				
1. Ветонит	478	398	500	483
2. Пескобетон М200	680	598	360	352
3. Смесь кладочная	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000
4. Смесь штукатурная	570	505	355	285
5. Смесь огнеупорная	795	713	690	545
6. Побелка садовая	98	145	195	158
7. Шпатлевка латексная	145	105	325	378
8. Глина для лепки	95	100	88	83
9. Глина каолиновая	475	452	225	238
10. Без добавок	76	98	130	114

По таблице 10 толщина покрытия у образцов ППС одной плотности может сильно колебаться, что связано с неровностью нарезки образцов ППС и неравномерностью нанесения огнезащитных покрытий. И по таблице видно, что толщина покрытий колеблется от 76 и свыше 1000 мм, поэтому методы определения адгезии решетчатых и параллельных надрезов применять нельзя. Остается два метода – метод отрыва и метод Х-образного надреза.

Метод Х-образного надреза [21] является простым, доступным и позволяет количественно и качественно оценить адгезионные свойства покрытия для металлических материалов. Однако, плиты из пенополистирола характеризуются достаточно высокой прочностью, жесткостью, высокой размерной стабильностью [14, 47], поэтому метод Х-образного надреза возможно применить и для пенополистирола. Определение адгезии методом отрыва [26] является более сложным в осуществлении и точную оценку адгезии было бы невозможно провести из-за текстурированности (шероховатости) покрытий, нанесенных кистью в один слой и высушенных при комнатной температуре.

#### 2.4 Оценка адгезионных свойств покрытий

Для определения адгезии методом Х-образного надреза по ГОСТ 32702.2-2014 [21] необходимо следующее оборудование:

- металлическая линейка – чтобы получить прямые кромки;
- однолезвийный режущий инструмент с толщиной лезвия  $(0,43 \pm 0,03)$  мм и углом заточки кромки  $20^\circ$ – $30^\circ$  (канцелярский нож);
- прозрачная липкая лента, приклеивающаяся при надавливании, адгезионной прочностью 2,4–4,0 Н/см. Ширина ленты должна быть не менее 50 мм (скотч).

Х-образные надрезы выполняют до поверхности пенополистирола канцелярским ножом. Каждый надрез длиной не менее 40 мм. Угол пересечения надрезов между  $30^\circ$  и  $45^\circ$ .

В начале новой серии испытаний с катушки скотча удаляют два полных витка скотча. При равномерной скорости отматывают и отрезают кусок длиной примерно 75 мм. Центр отрезанного скотча помещают на центр Х-образного надреза, разглаживают его вдоль острых углов, плотно прижимая к покрытию, и удаляют, держа за свободный конец и плавно отрывая за 0,5–1,0 с под углом примерно  $60^\circ$  вместе с отслоившимися участками покрытия.

Используя рисунок 13, определяют степень разрушения огнезащитного покрытия в баллах от 0 (высокая адгезия) до 5 (низкая адгезия). Результаты

адгезии представлены в таблице 11, примеры результатов адгезии огнезащитных покрытий с разными баллами представлены на рисунке 14.

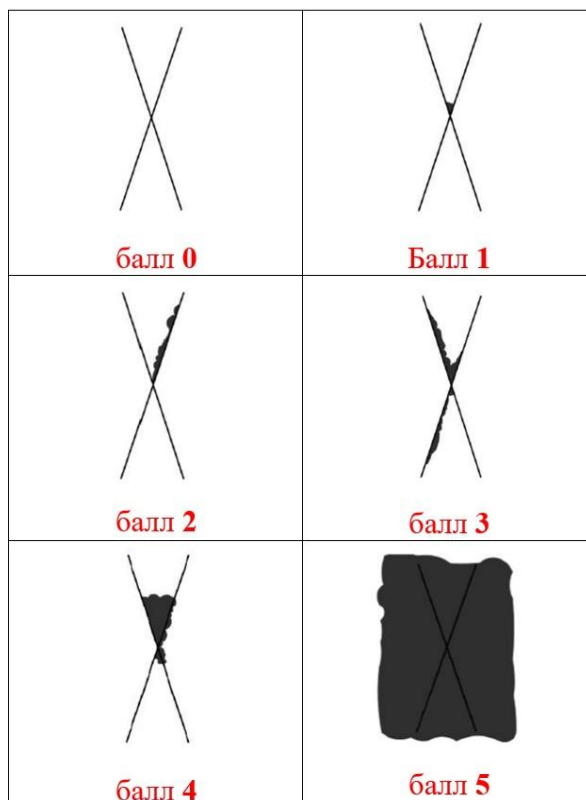


Рисунок 13 – Оценка результатов испытаний адгезии [21]

Таблица 11 – Результаты оценки адгезии методом X-образного надреза по ГОСТ 32702.2-2014 [21]

Добавки	Жидкое стекло + H <sub>2</sub> O + добавка, балл
1. Vetonit	3
2. Пескобетон М200	5
3. Смесь кладочная терракот	3
4. Смесь штукатурная терракот	5
5. Смесь огнеупорная	3
6. Побелка садовая	4
7. Шпатлевка латексная	2
8. Глина для лепки Чкаловского происхождения	1
9. Глина каолиновая	0
10. Без добавок	1



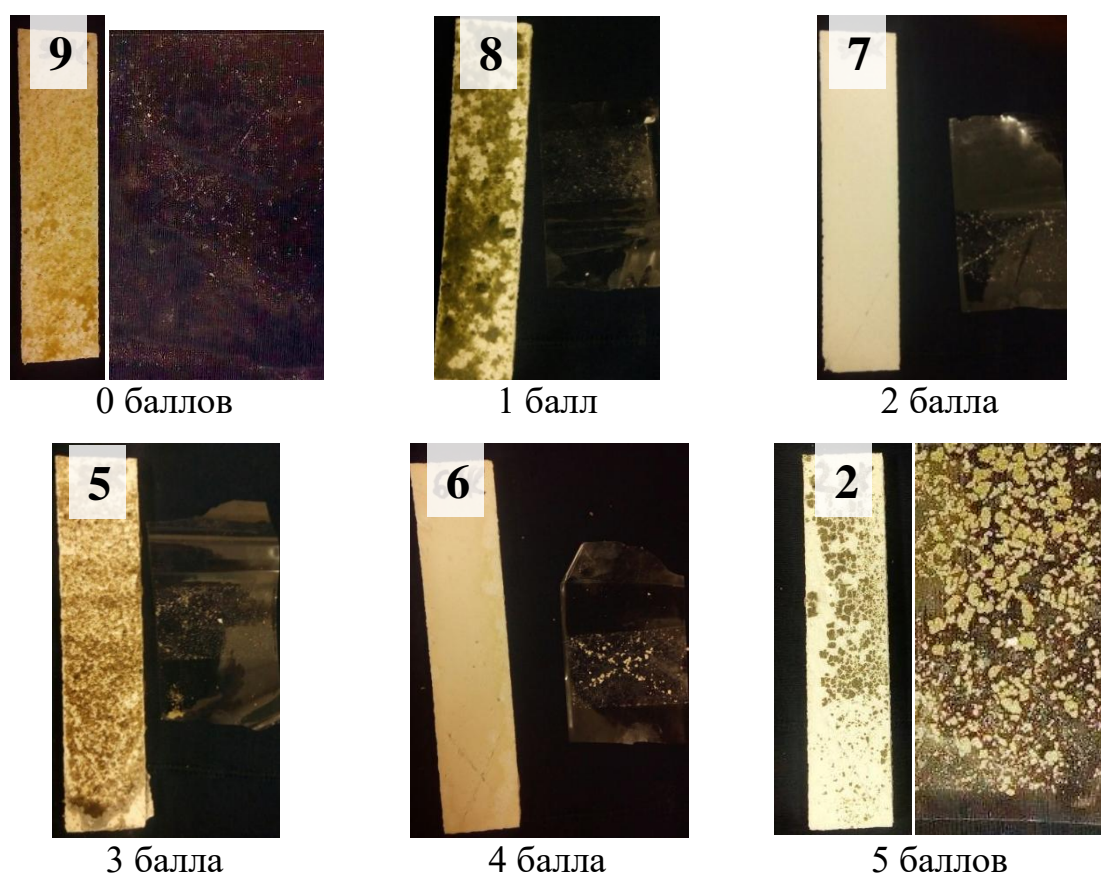


Рисунок 14 – Определение адгезии X-образными надрезами

Исходя из таблицы 11, можно сделать вывод, что огнезащитные составы с добавками пескобетон М200 (№2) и смесь штукатурная терракот (№4) имеют самую плохую адгезию – 5 баллов, а также с побелкой садовой (№6) – 4 балла. Наилучшими составами по адгезии проявили: глина каолиновая (№9), глина для лепки (№8) и состав без добавок (№10).

## 2.5 Оценка выгорания обработанных образцов пенополистирола

Оценка выгорания обработанных образцов ППС проводилась согласно методике по ГОСТ 15588-2014 [14]. Образец закрепляют в вертикальном положении на штативе и выдерживают в пламени горелки в течение 10 с, как показано на рисунке 15, но по ГОСТ [14] время горения должно быть 4 секунды. В данных опытах берется 10 секунд в целях лучшего оценивания степени выгорания образцов.



Рисунок 15 – Оборудование для оценки горючести образцов: штатив, спиртовая горелка, металлическая линейка, тигельные щипцы, перчатки

Вне зависимости от адгезии огнезащитных составов, проверялись все обработанные образцы ППС на эффективность огнезащиты по степени выгорания. Для оценки степени выгорания образцов использовался количественный показатель – степени выгорания образцов –  $\sigma$ , %. Результаты сжигания представлены на рисунке 17 и в таблице 12.

Сжигание образцов (см. рисунок 16) проводилось на пламени спиртовой горелки по ГОСТ 15588-2014 [14]:

- высота пламени горелки от конца фитиля около 50 мм;
- расстояние от образца до фитиля горелки около 10 мм;
- время горения 10 с (по ГОСТ 30244-94 [16] требуется 4 с).

Отмечено, что при горении образцы №6 плотностью  $20 \text{ кг/м}^3$  воспламеняются после нахождения в пламени от 5 с, а образцы № 10 плотностью  $20 \text{ кг/м}^3$  и №3, 5 плотностью  $28 \text{ кг/м}^3$  воспламеняются после нахождения в пламени от 9 с. При сжигании обработанные образцы ППС не плавилась. Это значит, что все десять огнезащитных покрытий снижают группу горючести материала.

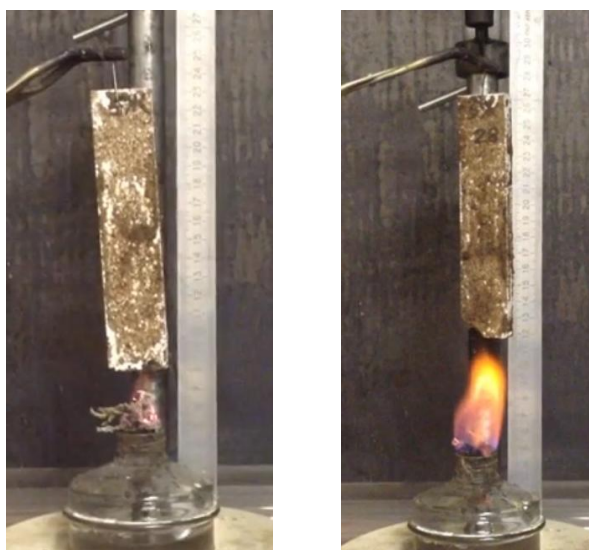


Рисунок 16 – Сжигание образцов ППС разной плотности на открытом пламени спиртовки с добавкой №5

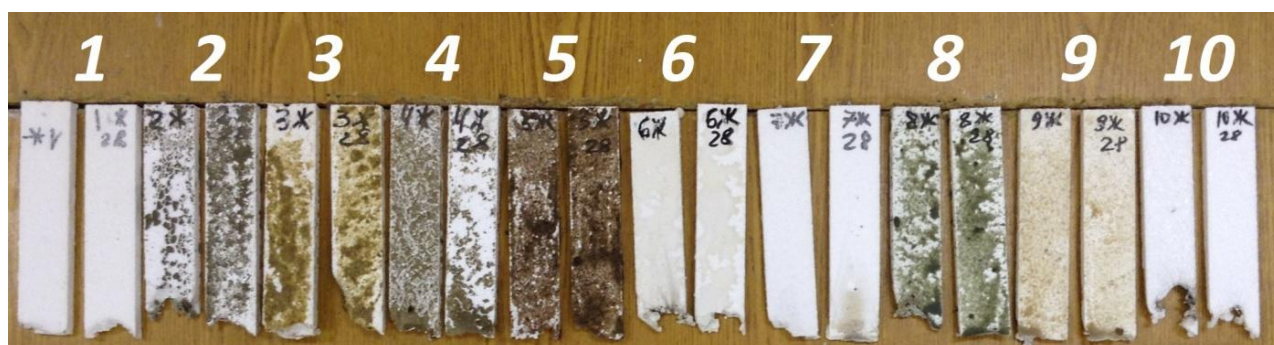


Рисунок 17 – Обработанные образцы ППС после сжигания



а)



б)

Рисунок 18 – Исходные образцы ППС после сжигания: а) плотностью  $20 \text{ кг/м}^3$ , б) плотностью  $28 \text{ кг/м}^3$

Таблица 12 – Степень выгорания образцов ППС, обработанных огнезащитными составами

Степень выгорания образцов, $\sigma$ %		
Добавки	Жидкое стекло + H <sub>2</sub> O + добавка	
	20кг/м <sup>3</sup>	28кг/м <sup>3</sup>
1. Vetonit	5	5
2. Пескобетон М200	15	10
3. Смесь кладочная «Терракот»	5	25
4. Смесь штукатурная «Терракот»	5	12
5. Смесь огнеупорная	5	5
6. Побелка садовая	12	10
7. Шпатлевка «Лакра»	5	5
8. Глина для лепки	10	5
9. Глина каолиновая	5	5
10. Без добавок	20	12

Лучшие результаты по степени выгорания показали образцы ППС, покрытые композициями №1, 5, 7, 8, 9 (см. рисунок 17 и таблицу 12). По сравнению с исходными образцами (см. рисунок 18), которые имеют степень выгорания 75% и 50%, все огнезащитные покрытия снижают степень горючести, а также при горении у таких образцов ППС отсутствует плавление.

Также во время горения образцов проводилась визуальная оценка устойчивости адгезионных свойств огнезащитных покрытий, которая выявила следующие результаты (см. таблицу 13).

Таблица 13 – Визуальная оценка устойчивости адгезионных свойств огнезащитных покрытий во время горения образцов ППС

Добавки	Жидкое стекло + H <sub>2</sub> O + добавка *
1. Vetonit	±
2. Пескобетон М200	–
3. Смесь кладочная терракот	±
4. Смесь штукатурная терракот	–
5. Смесь огнеупорная	+
6. Побелка садовая	±

Продолжение таблицы 13

Добавки	Жидкое стекло + H <sub>2</sub> O + добавка *
7. Шпатлевка латексная	+
8. Глина для лепки Чкаловского происхождения	+
9. Глина каолиновая	+
10. Без добавок	+
* Примечание: + покрытие не осыпается; ± покрытие отслаивается; – покрытие вспучивается и осыпается.	

Результаты по проведенным экспериментальным исследованиям сведем в одну таблицу 14 для подведения итогов.

Таблица 14 – Оценка эффективности огнезащитных покрытий для ППС

Добавки	Жидкое стекло + H <sub>2</sub> O + добавка		Добавки	Жидкое стекло + H <sub>2</sub> O + добавка	
	20кг/м <sup>3</sup>	28 кг/м <sup>3</sup>		20кг/м <sup>3</sup>	28 кг/м <sup>3</sup>
<b>1. Vetonit</b>	25%+25%+50%		<b>6. Побелка садовая</b>	30%+30%+40%	
Адгезия, балл *	3		Адгезия, балл	4	
Устойчивость адгезии при горении **	±		Устойчивость адгезии при горении	±	
Степень выгорания, %	5	5	Степень выгорания, %	12	12
Плавление	нет	нет	Плавление	нет	нет
<b>2. Пескобетон М200</b>	30%+30%+40%		<b>7. Шпатлевка «Лакра»</b>	30%+30%+40%	
Адгезия, балл	5		Адгезия, балл	2	
Устойчивость адгезии при горении	–		Устойчивость адгезии при горении	+	
Степень выгорания, %	15	10	Степень выгорания, %	5	5
Плавление	нет	нет	Плавление	нет	нет
<b>3. Смесь кладочная «Терракот»</b>	30%+30%+40%		<b>8. Глина для лепки</b>	35%+35%+30%	
Адгезия, балл	3		Адгезия, балл	1	
Устойчивость адгезии при горении	±		Устойчивость адгезии при горении	+	
Степень выгорания, %	2	25	Степень выгорания, %	10	2
Плавление	нет	нет	Плавление	нет	нет
<b>4. Смесь штукатурная «Терракот»</b>	30%+30%+40%		<b>9. Глина каолиновая</b>	35%+35%+30%	
Адгезия, балл	5		Адгезия, балл	0	
Устойчивость адгезии при горении	–		Устойчивость адгезии при горении	+	
Степень выгорания	5	12	Степень выгорания, %	2	5
Плавление	нет	нет	Плавление	нет	нет

Продолжение таблицы 14

Добавки	Жидкое стекло + Н <sub>2</sub> O + добавка		Добавки	Жидкое стекло + Н <sub>2</sub> O + добавка	
	20кг/м <sup>3</sup>	28 кг/м <sup>3</sup>		20кг/м <sup>3</sup>	28 кг/м <sup>3</sup>
<b>5. Смесь огнеупорная</b>	35%+35%+30%		<b>10. Без добавок</b>	50%+50%	
Адгезия, балл	3		Адгезия, балл	1	
Устойчивость адгезии при горении	+		Устойчивость адгезии при горении	+	
Степень выгорания, %	5	5	Степень выгорания, %	20	12
Плавление	нет	нет	Плавление	нет	нет

\* Примечание.

0 баллов – высокая адгезия;

5 баллов – плохая адгезия.

\*\* + покрытие не осыпается;

± покрытие отслаивается;

– покрытие вспучивается и осыпается.

Исходя из таблицы 14, можно сделать вывод, что огнезащитные покрытия на основе водного раствора жидкого стекла с добавками снижают горючесть пенополистирола – ниже степень выгорания образцов и отсутствует жидкая фаза (плавление) при горении. Покрытия с добавками «пескобетон» (№2) и «смесь штукатурная Терракот» (№4) показали худшие результаты, как по адгезии, так и по устойчивости адгезионных свойств покрытий во время горения, а значит, в практическом применении окажутся бессмысленными.

Также можно выделить наилучшие покрытия по всем рассмотренным параметрам, это покрытия с добавками: глина каолиновая (№ 9), глина для лепки (№8), шпатлевка «Лакра» (№7). Поэтому для дальнейшего исследования будут рассматриваться огнезащитные составы на основе водного раствора жидкого стекла с добавками №7 и №9 (№8 не самый распространенный материал, поэтому далее не исследуется), а также №10 – состав без добавок, для дальнейшего выявления эффективности огнезащитных добавок(№7 и №9) в базовом составе.

## ВЫВОДЫ ПО 2 ГЛАВЕ:

1. Выбран метод снижения горючести пенополистирола – поверхностное нанесение огнезащитных покрытий на основе водного раствора жидкого стекла с негорючими добавками.

2. С помощью метода Х-образного надреза была проведена оценка адгезии огнезащитных покрытий на пенополистироле, которая выявила 4 состава с хорошей адгезией и 3 состава со средней адгезией. Огнезащитные составы с добавками «пескобетон», «смесь штукатурная Терракот» легко отслаиваются и осыпаются с поверхности пенополистирола, с побелкой садовой – покрытие трескается, поэтому, они не подходят для огнезащиты.

3. Для оценки горючести образцов пенополистирола был использован количественный показатель – степень выгорания образцов. Все огнезащитные составы снижают горючесть пенополистирола, при горении отсутствует жидкая фаза (плавление).

4. Высокие огнезащитные свойства показали водные растворы на основе жидкого стекла с использованием негорючих добавок, таких как шпатлевка «Лакра», глина для лепки и глина каолиновая. Поэтому для дальнейшего исследования выбраны следующие растворы с добавками: шпатлевка «Лакра», глина каолиновая и раствор без добавок.

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ И ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА, ОБРАБОТАННОГО ОГНЕЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Теплопроводность пенополистирола зависит от многих факторов: химического состава, размера и расположения, кажущейся плотности, влажности и температуры. Но еще неизвестно, как огнезащитные покрытия влияют на теплопроводность пенополистирола.

В этой главе будут рассмотрены экспериментальные исследования по теплофизическим свойствам пенополистирола, обработанного огнезащитными составами, отобранными в предыдущей главе.

Для этого необходимо выполнить следующие этапы экспериментального исследования:

- 1) обработка составами образцов ППС;
- 2) определение коэффициента теплопроводности;
- 3) определение теплового сопротивления;
- 4) определение водопоглощения;
- 5) анализ результатов.

#### 3.1 Обработка составами образцов ППС

Для стеновых и теплоизоляционных строительных материалов одной из главных характеристик является коэффициент теплопроводности, который применяется в качестве оценки их теплозащитных свойств. Пенополистирол отличается от всех утеплительных материалов самой низкой теплопроводностью, которая по ГОСТ 15588-2014 [6] для материала плотностью 20 кг/м<sup>3</sup> не должна превышать 0,035 Вт/(м·К), плотностью 28 кг/м<sup>3</sup> – 0,033 Вт/(м·К) [41].

Неорганические вещества, входящие в состав исследуемых огнезащитных покрытий, имеют более высокую теплопроводность, например, теплопроводность жидкого стекла составляет 0,07–0,09 Вт/(м·К), глины каолиновой – 0,1–0,3 Вт/(м·К), шпатлевки – в пределах 0,1–0,7 Вт/(м·К), что предполагает



изменение теплофизических свойств, при нанесении огнезащитных составов на поверхность ППС.

Для проведения экспериментов на исследование теплофизических свойств пенополистирола также использовались образцы беспрессового ППС двух плотностей: 20 и 28 кг/м<sup>3</sup>. Для начала заготавливались образцы размерами (150×150×18)±2 мм [46]. Затем образцы покрывались поверхностным способом с помощью малярной кисти (см. рисунок 19).

Для разведения растворов (см. таблицу 15) и покрытия образцов использовалось следующее лабораторное оборудование:

- мерный стакан 50 мл;
- столовая ложка;
- весы электронные 2-го класса точности с погрешностью ±0,01 г;
- малярная кисть.

Базовое вещество – жидкое стекло разбавляется водой в отношении 1:1. Сушка образцов проводилась при комнатной температуре в течение 24 часов (см. рисунок 20).



Рисунок 19 – Обработка образцов ППС огнезащитными составами

Таблица 15 – Огнезащитные составы для ППС для проверки теплопроводности

Добавки	Жидкое стекло + вода + добавка, % масс.
7. Шпатлевка латексная	30 + 30 + 40
9. Глина каолиновая	35 + 35 + 30
10. Без добавок	50 + 50



Рисунок 20 – Обработанные огнезащитными составами образцы ППС

### 3.2 Определение коэффициента теплопроводности

После того, как образцы ППС высохли, переходим к экспериментальному определению коэффициента теплопроводности.

Для определения теплопроводности образцов ППС, покрытых огнезащитными составами, использовался прибор ИТС-1 [46]. Метод определения коэффициента теплопроводности основан на создании проходящего через исследуемый плоский образец стационарного теплового потока, направленного перпендикулярно к лицевым граням образца показан на рисунке 21. Температура окружающей среды при проведении экспериментов 21–24 °С, относительная влажность 40–45 %. В ходе эксперимента фиксируется стационарный тепловой поток  $q$  и разность температур между противоположными гранями образца  $\Delta T$ .



Рисунок 21 – Измеритель теплопроводности ИТС-1: а) прибор с образцом для испытаний; б) схема принципа действия прибора

Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ) вычисляется по формуле:

$$\lambda = d \cdot q / \Delta T, \quad (9)$$

где  $q$  – плотности теплового потока, проходящего через образец, Вт/м<sup>2</sup> (см. рисунок 21б);

$d$  – толщина образца, мм (см. рисунок 21б);

$\Delta T$  – разность температур между противоположными гранями образца (см. рисунок 21б).

Результаты полученных измерений представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Коэффициент теплопроводности ППС с огнезащитным покрытием

Огнезащитный состав	Добавка к огнезащитному составу	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	
		20 кг/м <sup>3</sup>	28 кг/м <sup>3</sup>
Водный раствор жидкого стекла	Шпатлевка «Лакра»	0,035	0,035
	Глина каолиновая	0,035	0,034
	–	0,034	0,035

Из таблицы 16 следует, что независимо от огнезащитного состава и добавок, коэффициент теплопроводности практически не отличается от исходных образцов без покрытий. Уплотнённая корка, имеющаяся на поверхности самого ППС, увеличивает стабильность коэффициента  $\lambda$  [57]. Поэтому огнезащитные составы, нанесенные на поверхность материала, образуют защитную пленку, которая, как показывают экспериментальные данные, не оказывает влияние на коэффициент теплопроводности ППС [23].

### 3.3 Определение теплового сопротивления

Тепловое сопротивление – способность тела (его поверхности или какого-либо слоя) препятствовать распространению теплового движения молекул. Зависит от теплопроводности и толщины материала и находится по формуле:

$$R = \frac{l}{\lambda}, \quad (10)$$

где  $l$  – толщина ППС;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

При одинаковом тепловом сопротивлении ППС имеет наименьшую толщину, по сравнению с другими теплоизоляционными материалами (см. рисунок 22).

### Одинаково сохраняют тепло

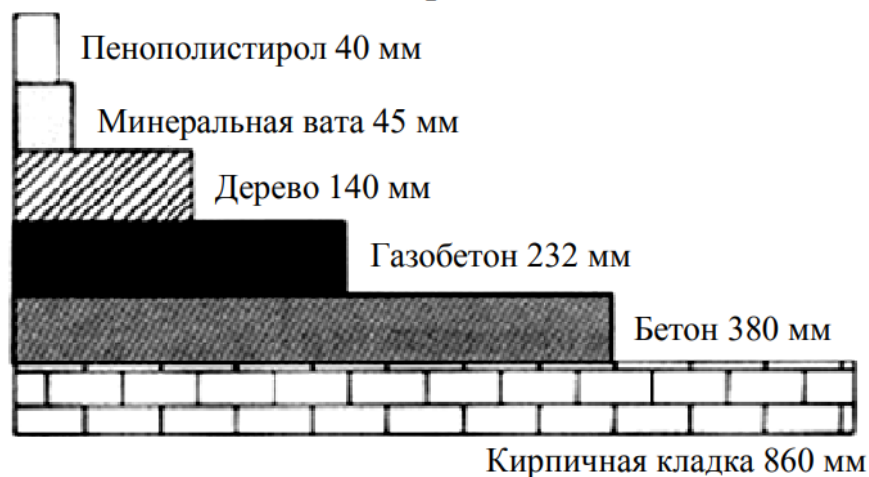


Рисунок 22 – Соотношение толщин различных материалов при одинаковом термическом сопротивлении [57]

Зная толщину исследуемых образцов пенополистирола, определим тепловое сопротивление (см. таблицу 17).

Таблица 17 – Тепловое сопротивление обработанных огнезащитными составами образцов ППС

Тепловое сопротивление $R$ , $(K \cdot m^2)/Вт$		
Жидкое стекло + $H_2O$ + добавка	$20 кг/м^3$	$28 кг/м^3$
7. Шпатлевка «Лакра»	0,51	0,51
9. Глина каолиновая	0,51	0,53
10. Без добавок	0,53	0,51

У исходного образца тепловое сопротивление при плотности  $20 кг/м^3$  составляет  $0,51 (K \cdot m^2)/Вт$ , при плотности  $28 кг/м^3$  –  $0,55 (K \cdot m^2)/Вт$ . Также, как и коэффициент теплопроводности, тепловое сопротивление не сильно различается – всего на сотые единицы. Эффективность теплоизоляционного материала сохранится.

### 3.4 Определение водопоглощения

Другим важным показателем строительных материалов является водопоглощение. В данном исследовании показатель водопоглощения позволяет оценить водостойкость огнезащитного покрытия. Чем выше значение водопоглощения, тем больше воды впитал образец пенополистирола.

В соответствии с ГОСТ [14] водопоглощение за 24 часа по объему у пенополистирола плотностью 20 и 28 кг/м<sup>3</sup> не должно превышать 2,0%. Несмотря на то, что пенополистирол по своей структуре не гигроскопичен, не растворяется и не деформируется (не разбухает) в воде, под действием механизма капиллярной диффузии вода может проникнуть в полости между гранулами пенопласта [41].

Водопоглощение образцов ППС с защитными покрытиями определяется по ГОСТ 15588-2014 (см. таблицу 18). Сущность метода заключается в определении массы воды, поглощенной образцами сухого материала после полного погружения их в дистиллированную воду и выдерживания в ней в течение заданного времени [14].

Еще сухие образцы предварительно взвешивают на электронных весах 2-го класса точности. Затем образцы помещают в ванну на подставку из лодочек и фиксируют их положение пригрузом. В ванну заливают дистиллированную воду с температурой  $(22\pm 5)^{\circ}\text{C}$  так, чтобы уровень воды был выше пригруза не менее чем на 20 мм (см. рисунок 23).



Рисунок 23 – Ванна с образцами и дистиллированной водой для определения водопоглощения



Рисунок 24 – Взвешивание образцов после водопоглощения

Водопоглощение  $W$ , % по объему, вычисляют по формуле:

$$W_B = \frac{m - m_0}{V\gamma_0} 100, \quad (11)$$

где  $m$  – масса образца после выдерживания его в воде, г;

$m_0$  – масса образца до погружения в воду, г;

$V$  – объем образца, см<sup>3</sup>;

$\gamma_0$  – плотность воды, г/см<sup>3</sup>.

Таблица 18 – Данные взвешивания образцов ППС до и после проведения испытаний на водопоглощение

Базовое вещество	Добавки	Плотность 20 кг/м <sup>3</sup>			
		Толщина, мм	Вес до, г	Вес после, г	Размер после, мм
0. Исходный образец	–	18,2	7,73	8,54	149,2x150,8x18
1. Жидкое стекло + H <sub>2</sub> O +	Шпатлевка «Лакра»	18,55	12,12	11,98	151,5x149x18,5
	Глина каолиновая	18	10,03	9,27	150,6x148,5x17,5
	–	18,4	8,37	8,59	149x151,5x18
		Плотность 28 кг/м <sup>3</sup>			
0. Исходный образец	–	18,2	10,19	10,31	149,5x149,4x18
1. Жидкое стекло + H <sub>2</sub> O +	Шпатлевка «Лакра»	18	13,57	15,47	150,5x149,1x18
	Глина каолиновая	18	11,95	12,18	145,8x149,5x18
	–	18,8	14,17	13,05	149,5x149,8x18,8

Таблица 19 – Водопоглощение образцов ППС с защитными покрытиями

Огнезащитный состав	Добавка к огнезащитному составу	Водопоглощение за 24 ч, %
Водный раствор жидкого стекла	Шпатлевка «Лакра»	0,47
	Глина каолиновая	0,06
	–	0,05
Исходный образец		0,20

На основании полученных результатов (см. таблицу 19) следует, что водопоглощение исходного материала составляет 0,2% и не превышает установленных требований. Образцы ППС с огнезащитными покрытиями на основе водного раствора жидкого стекла и негорючих добавок, за исключением состава со шпатлевкой «Лакра», характеризуются величиной водопоглощения до 0,06%, т.е. огнезащитная пленка на поверхности образца является водонепроницаемой и устойчивой к влаге. Шпатлевка «Лакра» имеет большее значение. Это объясняется, по-видимому, тем, что шпатлевка немного нарушает целостность поверхностной корки пенополистирола, тем самым открывая ячейки, куда может попадать вода.

На основе проведенных опытов сведем результаты в единую таблицу 20.

Таблица 20 – Результаты исследования теплопроводности, теплового сопротивления и водопоглощения обработанных образцов ППС

Показатели	Исходный образец		Жидкое стекло + вода +				Без добавок	
			Шпатлевка «Лакра»		Глина каолиновая			
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	20	28	20	28	20	28	20	28
Адгезия, балл	–		2		0		1	
Степень выгорания $\sigma$ , %	75	70	5	5	5	5	20	12
Плав	+++	+++	–	–	–	–	–	–
Устойчивость адгезии			+		+		+	
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	0,035	0,033	0,035	0,035	0,035	0,034	0,034	0,035
Тепловое сопротивление R, (К·м <sup>2</sup> )/Вт	0,51	0,55	0,51	0,51	0,51	0,53	0,53	0,51
Водопоглощение W за 24 ч, %	0,20		0,47		0,06		0,05	

Предлагается комплексная оценка (методика) огнезащитных покрытий для выявления пожароопасности и теплофизических свойств пенополистирола, обработанного этими покрытиями. В данную методику входит: проверка адгезии покрытий, степени выгорания образцов, визуальная оценка плавления и устойчивости адгезионных свойств покрытий при горении, определение изменений коэффициента теплопроводности, теплового сопротивления и водопоглощения.

#### ВЫВОДЫ ПО 3 ГЛАВЕ:

1. Исследование огнезащитных составов на основе водного раствора жидкого стекла с добавками на образцах пенополистирола в измерителе теплопроводности ИТС-1 показало, что коэффициент теплопроводности почти не изменяется.

2. Тепловое сопротивление, которое показывает насколько может сохранять тепло при известной толщине теплоизоляционный материал, у покрытых образцов практически не отличается от исходных образцов без покрытий.

3. Водный раствор жидкого стекла с добавкой «глина каолиновая» и без добавок оказало снижение водопоглощения у образцов пенополистирола. Состав с добавкой «шпатлевка «Лакра» наоборот, увеличило водопоглощение образцов, поэтому не подходит для практического применения в строительстве.

4. Предлагается методика для оценки пожароопасности и теплофизических свойств пенополистирола, обработанного огнезащитными покрытиями.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пенополистирол используют в качестве утеплительного и изолирующего материала в строительстве из-за основного его достоинства – низкой теплопроводности. Динамика потребления пенополистирола в России начала снижаться в связи с основным недостатком материала – высокой пожароопасностью. Анализ нормативных документов показал, что, несмотря на существенное усиление требований безопасности с 2016 года к горючему строительному материалу пенополистиролу, остаются неоднозначности требований, по оценке его пожарно-технических показателей. ППС, являясь твердым материалом, при горении активно плавится, а плав растекается и инициирует дальнейшее горение.

В связи с этим, для снижения горючести и плавления пенополистирола был рассмотрен метод снижения горючести пенополистирола путем нанесения огнезащитных покрытий поверхностным способом. При проведении патентного поиска в период с 1987–2015 гг., выяснилось, что наибольшее предложение выявили неорганические огнезащитные средства. Поэтому в качестве базового вещества использовался водный раствор жидкого стекла с негорючими добавками.

Экспериментальная часть по подбору огнезащитных составов и проверке теплофизических свойств заключается в следующих этапах:

- 1) Нанесение на поверхность образцов ППС огнезащитных составов.
- 2) Сушка образцов при комнатной температуре (21 °С) в течение суток.
- 3) Оценка адгезионных свойств покрытий (качество прилипания покрытия) – степени сцепления с поверхностью ППС.
- 4) Огневое испытание образцов.
- 5) Оценка результатов огневых испытаний: визуальная оценка устойчивости покрытия при огневом испытании, оценка степени выгорания и наличия плавления у образцов ППС.

б) Определение коэффициента теплопроводности, теплового сопротивления и водопоглощения.

7) Анализ полученных результатов.

До проверки горючести обработанных образцов пенополистирола проверялось качество огнезащитных покрытий методом Х-образного надреза, после которого отсеклось 3 покрытия с низкой адгезией. Это покрытия с добавками «смесь штукатурная», «побелка садовая» и «пескобетон».

В опытах по сжиганию пенополистирола наблюдались 3 показателя: горючесть, плавление и устойчивость адгезии при горении. Наблюдалось снижение степени выгорания в 14 раз у образцов № 1, 5, 7 и 9. При этом при сжигании всех обработанных образцов отсутствует плавление. Устойчивой адгезией обладают образцы №5 (с огнеупорной смесью), №7 (со шпатлевкой «Лакра»), №8 и №9 (с глиной для лепки и каолином соответственно) и №10 (без добавок).

В итоге высокие огнезащитные свойства показали водные растворы на основе жидкого стекла с использованием негорючих добавок, таких как шпатлевка «Лакра», глина для лепки и глина каолиновая.

Исследование теплофизических свойств огнезащитных покрытий на измерителе теплопроводности ИТС-1 показало, что коэффициент теплопроводности пенополистирола, также как, и тепловое сопротивление, изменяется на (0–0,002) единицы, что не существенно, поэтому теплопроводность ППС не будет зависеть от компонентного состава нанесенного огнезащитного раствора. Пенополистирол останется материалом с низкой теплопроводностью, но с более высокой группой горючести (Г2–Г3).

Уплотнённая корка, имеющаяся на поверхности самого ППС, увеличивает стабильность коэффициента теплопроводности. Поэтому огнезащитные составы, нанесенные на поверхность материала, образуют также защитную пленку, которая, как показывают экспериментальные данные, не оказывает влияние на коэффициент теплопроводности ППС.

Также были проведены опыты на водопоглощение с целью выявления водостойкости огнезащитных покрытий. Водный раствор жидкого стекла с добавкой «глина каолиновая» и без добавок показало снижение водопоглощения у образцов пенополистирола в 4 раза. Такое покрытие обеспечит защиту материала от проникновения воды во влажных условиях эксплуатации. Состав с добавкой «шпатлевка «Лакра» наоборот, увеличило водопоглощение образцов с 0,2% до 0,47%, поэтому он не подходит для практического применения в строительстве.

На основе проделанных экспериментальных исследований, предлагается методика для оценки пожароопасности и теплофизических свойств пенополистирола, обработанного огнезащитными покрытиями, в которую входит определение степени выгорания образцов ППС, визуальная оценка наличия плавления при горении и степень адгезии покрытий, а также проверка теплофизических свойств, теплового сопротивления и водопоглощения.

На основании результатов проведенных исследований установлено, что применение негорючих и жаростойких материалов в составах огнезащитных покрытий, обеспечивает снижение пожарной опасности и не влияет на теплофизические свойства пенополистирола.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конституция Российской Федерации от 12.12.1993 г. (с изменениями на 21 июля 2004 г.).
2. Федеральный закон от 21.12.1994 года (с изменениями на 29.07.2017 г.) N 69-ФЗ «О пожарной безопасности».
3. Федеральный закон от 22.07.2008 года (с изменениями на 29.07.2017 г.) N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
4. Федеральный закон от 30.12.2009 года (с изменениями на 02.07.2013 г.) N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
5. Ассоциация европейских производителей пенополистирола. Как ведет себя ППС при пожаре? – Eumers. 2002.
6. Бек-Булатов, А.И. Пенополистирол – история создания и долговечность / А.И. Бек-Булатов // Строительные материалы. – М.: Изд-во Стройматериалы, 2010. – С. 92–93.
7. Богданова, Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов / Ю.Г. Богданова: уч. пособие. – М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. – 68 с.
8. Владимирова, Н.Е. Исследование уменьшения токсичности и горючести пенополистирола путем пропитки жидким стеклом: ВКР / Н.Е. Владимирова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2016. – 79 с.
9. Владимирова, Н.Е. Экспериментальные исследования уменьшения горючести и дымообразования при обработке пенополистирола составами с жидким стеклом / Н.Е. Владимирова, И.П. Палатинская, С.И. Боровик, Р.Т. Аскарров // Наука ЮУрГУ: материал 68-й науч. конф. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2016. – С. 374–380.
10. Всероссийский отраслевой интернет-журнал. – Пенополистирол: кто влияет на российский рынок. – Электронный ресурс (дата обращения: 14.09.2017). – <http://rcmm.ru/ekonomika-i-biznes/24433-penopolistirok-kto-vliyaet-na-rossiyskiy-rynok.html>.

11. ГОСТ 12.1.044-89 ССБТ. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
12. ГОСТ 13078-81. Стекло натриевое жидкое. Технические условия.
13. ГОСТ 15140-78. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии.
14. ГОСТ 15588-2014. Плиты пенополистирольные теплоизоляционные. Технические условия.
15. ГОСТ 15588-86. Плиты пенополистирольные. Технические условия (недействующий).
16. ГОСТ 30244-94. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть.
17. ГОСТ 30444-97. Материалы строительные. Метод испытания на распространение пламени.
18. ГОСТ 31149-2014 (ISO 2409:2013). Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза (с поправкой).
19. ГОСТ 31993-2013 (ISO 2808:2007). Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия.
20. ГОСТ 32299-2013 (ISO 4624:2002). Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва.
21. ГОСТ 32702.2-2014 (ISO 16276-2:2007). Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом Х-образного надреза.
22. ГОСТ Р 56148-2014. Изделия из пенополистирола ППС (EPS) теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Технические условия.
23. Дементьева, Е.С. Исследование свойств пенополистирола при обработке огнезащитными составами на основе водного раствора жидкого стекла // Е.С. Дементьева, И.П. Палатинская, С.И. Боровик / Проблемы недропользования: материалы межд. форума-конкурса. – СПб: СПГУ, 2018. – С. 155.
24. Дементьева, Е.С. Исследование снижения горючести пенополистирола путем обработки ортофосфорной кислотой / Е.С. Дементьева, И.П. Палатинская, С.И. Боровик // Проблемы безопасности современного мира. – Иркутск: Изд-во ИРННТУ, 2016. – С. 121–123.

25. Дементьева, Е.С. Исследование уменьшения токсичности и горючести пенополистирола путем пропитки ортофосфорной кислотой: ВКР / Е.С. Дементьева. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2016. – 119 с.

26. Дементьева, Е.С. Экспериментальное исследование оценки сажеобразования и плава при горении образцов пенополистирола, обработанных ортофосфорной кислотой / Е.С. Дементьева, И.П. Палатинская, С.И. Боровик // Безопасность – 2017: материалы докладов XXII Всеросс. студ. научно-практич. конф. с международ. участием. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. – С. 241–243.

27. Дементьева, Е.С. Экспериментальные исследования уменьшения горючести и дымообразования при обработке пенополистирола составами с ортофосфорной кислотой / Е.С. Дементьева, И.П. Палатинская, С.И. Боровик, Р.Т. Аскарлов // Наука ЮУрГУ: материал 68-й науч. конф. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2016. – С. 395–403.

28. Домостроительная компания РОСИЧИ. – Пенополистирол – утеплитель для СИП панелей. – Видеоматериал. – <https://www.youtube.com/watch?v=N9xSwf2GZFo>.

29. Доронин, Е.В. Исследование пожарно-технических характеристик пенополистирола / Е.В. Доронин, Е.С. Седышев // Харьковская национальная академия городского хозяйства. – Харьков, С.140–143.

30. Камалова, Е. Теплоизоляционные материалы: нет дыма без огня? / Е. Камалова // Кровля. Фасады. Изоляция. – 2007. – №6. – С. 60–66.

31. Качур, В.А. Исследование уменьшения токсичности и горючести пенополистирола путем пропитки натрием кремнефтористым: ВКР / В.А. Качур. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2016. – 80 с.

32. Качур, В.А. Экспериментальные исследования уменьшения горючести и дымообразования при обработке пенополистирола составами с натрием кремнефтористым / В.А. Качур, И.П. Палатинская, С.И. Боровик, Р.Т. Аскарлов // Наука ЮУрГУ: материал 68-й науч. конф. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2016. – С. 381–387.

33. Кетов, А.А. К вопросу пожарной опасности пенополистирола, самозатухающего в условиях окислительного пиролиза / А.А. Кетов, М.П. Красновских, Н.Г. Максимович // Экология и промышленность России. – М.: Изд-во Калвис, 2013. – С. 41–45.

34. Ключкин, Ф.Ю. Возведение жилых малоэтажных домов с помощью несъемной опалубки из пенополистирола / Ф.Ю. Ключкин, К.Р. Геккиев // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник трудов XVII междунар. науч. конф. – 2014. – С. 256–260.

35. Коканин, С.В. Исследование долговечности теплоизоляционных материалов на основе пенополистирола: дис....канд. тех. наук / С.В. Коканин. – Иваново, 2011. – 170 с.

36. Мустафаев, Р.М. Оптимизированный экструзионный пенополистирол / Р.М. Мустафаев, А.А. Майорова, А.А. Скиба, А.Д. Жуков // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник трудов. – М.: МГСУ, 2014. – С. 1008–1010.

37. Огнестойкость и пожарная опасность конструкций покрытий на основе стального профилированного листа с полимерным утеплителем: Рекомендации. – М.: ФГБУ ВНИИПО, 2015. – 29 с.

38. Павлов, В.А. Пенополистирол / В.А. Павлов. – М.: Изд-во «Наука», 1973. – 239 с.

39. Палатинская, И.П. Анализ горючести плит из пенополистирола / И.П. Палатинская, С.И. Боровик, Н.Е. Владимирова и др. // Наука сегодня: проблемы и пути решения: материалы междунар. научно-практич. конф. – Вологда: Изд-во НЦ «Диспут», 2016. – С. 60–61.

40. Палатинская, И.П. Анализ требований нормативной документации по пожарно-техническим показателям пенополистиролов / И.П. Палатинская, С.И. Боровик, Е.С. Дементьева и др. // Сервис технических систем – агропромышленному комплексу России: материал междунар. научно-практич. конф. – Челябинск: Изд-во ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 2017. – С.159–165.

41. Палатинская, И.П. Исследование влияния огнезащитных покрытий на свойства пенополистирола / И.П. Палатинская, С.И. Боровик, А.А. Орлов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 47–52.

42. Палатинская, И.П. Исследование эффективности огнезащитных покрытий для пенополистирола / И.П. Палатинская, С.И. Боровик, В.А. Синтяева и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 44–51.

43. Палатинская, И.П. Экспериментальные исследования дымообразования при сжигании пенополистирола / И.П. Палатинская, С.И. Боровик, Е.С. Дементьева, Н.Е. Редькина, В.А. Синтяева // БЖД глазами молодежи: материалы IV Всероссийской студ. конф. – 2017. – С. 251–255.

44. Петрова, З.К. Применение инновационных технологий жизнеобеспечения для малоэтажной застройки в различных градостроительных ситуациях / З.К. Петрова, К.В. Шишов, В.О. Долгова // Градостроительство. – М.: Изд-во ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ, 2017. – №1. – С. 78–84.

45. Полистирол, АБС и вспененные полимеры. – Москва, 2014. – Электронный ресурс (дата обращения: 14.09.2017). – <http://www.creonenergy.ru/consulting/detailConf.php?ID=112869>.

46. Руководство по эксплуатации ИТС-1 Измеритель теплопроводности [Электронный ресурс]. – <https://www.interpribor.ru/assets/userfiles/11/126/Its-1.pdf>.

47. Савкин, Ю.В. Итоги 2014 и ожидания 2015 в сегменте ППС (EPS). Новый ГОСТ на пенополистирол // Ассоциация производителей и поставщиков пенополистирола. – II Практическая конференция «Полимеры в теплоизоляции». – М., 2015.

48. Савкин, Ю.В. Новый ГОСТ на пенополистирол // Строительная орбита. – М.: Газетное изда-во, 2016. – №07. С. 16–18.

49. Савкин, Ю.В. Перспективы применения пенополистирола в энергоэффективных теплоизоляционных системах // Ассоциация



производителей и поставщиков пенополистирола. – Конгресс «Строительная изоляция». – М., 2016.

50. Сертификат соответствия №С-RU.ПБ05.В.00642 (приложение) от 23.03.2010.

51. Сертификат соответствия №С-RU.ПБ57.В.01230 (приложение) от 10.08.2012.

52. Сертификат соответствия №С-RU.ПБ58.В.01745 (приложение) от 26.10.2015.

53. Сычева Е. История с утеплением или энергоэффективная Германия / Е. Сычева // Ассоциация производителей и поставщиков пенополистирола. – Электронный ресурс (дата обращения 14.09.2017). – [https://archi.ru/tech/news\\_45277.html](https://archi.ru/tech/news_45277.html).

54. Ушанов, В.В. Огнестойкость и пожарная опасность сэндвич-панелей и предложении по внесению изменений в нормативные правовые акты по пожарной безопасности в части их применения в зданиях и сооружениях различного функционального назначения / В.В. Ушанов, В.Е. Фадеев, В.С. Харитонов, В.И. Щелкунов, А.В. Павловский, А.А. Косачев // Пожарная безопасность. – Балашиха: Изд-во ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ, 2016. – №4. – С. 119–121.

55. Фиговский, О.Л. Жидкое стекло и водные растворы силикатов, как перспективная основа технологических процессов получения новых нанокпозиционных материалов / О.Л. Фиговский, П.Г. Кудрявцев // Инженерный вестник Дона. – 2014. – Т.29, №2. – С. 117.

56. Шевченко, В.Г. Основы физики полимерных композиционных материалов / В.Г. Шевченко: уч. пособие. – М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. – 99 с.

57. Ярцев, В.П. Физико-механические и технологические основы применения пенополистирола при дополнительном утеплении зданий и сооружений: уч. пособие / В.П. Ярцев, К.А. Андрианов, Д.В. Иванов. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 120 с.

58. BS 6203:1991. Пенополистирол, используемый в строительстве. Руководство по характеристикам горения и методам испытаний на огнестойкость.

59. Palatinskaya, I.P. Experimental study on proportioning of flame retardant material for reducing the flammability of expanded polystyrene / I.P. Palatinskaya, S.I. Borovik, N.E. Vladimirova, E.S. Dementieva, V.A. Sintyaeva // Modern Science. – Moscow, 2016. – p. 22–26.