

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ
ПОКРЫТИЯ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА НА ЕГО ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТЬ
С ПОМОЩЬЮ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА**

**EVALUATION OF THE EFFECT OF THE COMPONENTS
OF THE POLYSTYRENE FOAM COATING ON ITS FLAMMABILITY
USING REGRESSION ANALYSIS**

А.М. МОЧАЛОВ, М.В. АКУЛОВА, Д.А. УЛЬЕВ, И.Ю. ШАРАБАНОВА

A.M. MOCHALOV, M.V. AKULOVA, D.A. ULYEV, I.Y. SHARABANOVA

**(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Ивановский государственный политехнический университет)**

**(Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Ivanovo State Polytechnical University)**

E-mail: anton.mochalov.93@mail.ru

Пенополистирол применяется в различных областях промышленности, особенно часто – в качестве теплоизоляции. Наряду с положительными свойствами пенополистирол обладает следующими пожароопасными свойствами: высокой воспламеняемостью, токсичностью продуктов горения, быстрым распространением пламени. Это ограничивает его повсеместное применение.

В данной работе приведены результаты исследования влияния различных компонентов композиционного покрытия на воспламеняемость пенополистирола, установлено их положительное влияние на увеличение времени воспламенения. Показано, что время воспламенения пенополистирола с покрытием увеличивается в несколько раз по сравнению с контрольным образцом. Посредством проведения регрессионного анализа определена концентрация компонентов, входящих в состав композиционного покрытия: органосилоксана (полиэтилсилоксановая жидкость) и жидкого стекла. Приводятся результаты влияния предложенного жидкофазного покрытия на воспламеняемость пенополистирола. Представлены результаты регрессионного анализа, подтверждающего эффективность разработанного состава при воздействии пламени на поверхность пенополистирола.

Expanded polystyrene is used in various fields of industry, especially often it is used as thermal insulation. Along with the positive properties, expanded polystyrene has the following fire-hazardous properties: high flammability, toxicity of combustion products, rapid flame speed. This limits its widespread use.

This paper presents the results of a study of the effect of various components of the composite coating on the flammability of polystyrene foam, their positive effect on increasing the combustion time is established. It is shown that the combustion time of coated polystyrene foam increases several times compared to the control sample. By means of regression analysis, the concentration of the components that make up the composite coating was determined: organosiloxane (polyethylsiloxane liquid) and liquid glass. The results of the influence of the proposed liquid-phase coating on the flammability of expanded polystyrene are presented. The results of

regression analysis confirming the effectiveness of the developed composition when exposed to flame on the surface of polystyrene foam are presented.

Ключевые слова: покрытие, пенополистирол, органосилоксаны, жидкое стекло, двухфакторный эксперимент, пожарно-технические свойства.

Keywords: coating, expanded polystyrene, organosiloxanes, liquid glass, two-factor experiment, fire-technical properties.

Введение

Пенополистирол, применяемый в промышленности, наряду с положительными свойствами обладает и пожароопасными свойствами: высокой воспламеняемостью, токсичностью продуктов горения, быстрым распространением пламени. Так, линейная скорость распространения огня по поверхности пенополистирола составляет 1 см/с, воспламенение пенополистиролов происходит при температуре от 220 до 380°C, самовоспламенение соответствует температуре 460...480°C. Это ограничивает сферы его применения [1].

Анализ литературных данных [2...4] показал, что в настоящее время с целью снижения пожарной опасности пенополистирола производители добавляют антипирены в полистирольную массу. Такой пенополистирол называют "самозатухающим", однако их применение не позволяет снизить пожарную опасность пенополистирольных плит, а сами антипирены имеют высокую стоимость.

С целью снижения пожарной опасности пенополистирола в данной работе предложен огнезащитный состав на основе органосилоксанов, приведены его пожарно-технические и физические свойства.

Состав включает органосилоксан и жидкое стекло, что, с одной стороны, с помощью органической составляющей повышает адгезию покрытия к пенополистирольной подложке, а с другой стороны – повышенное содержание кремния создает на поверхности прочное огнезащитное покрытие. Органосилоксаны, или силиконы, составляют наиболее важную из групп полимеров, в которых основная цепь образована вместе с углеродом другими элементами. Участки разной полярности отдельных силоксановых группировок линейных силок-

сановых цепей при вращении вокруг связей стремятся расположиться в пространстве так, чтобы дипольные моменты разных группировок были, по возможности, скомпенсированы [5], [6]. Жидкое стекло широко распространено в огнезащите и других областях [9], [10].

Задачей данного исследования являлось с помощью регрессионного метода анализа определение влияния различных компонентов композиционного покрытия на воспламеняемость пенополистирола, определение максимального времени воспламенения и определение влияния покрытия на коэффициент теплопроводности и водопоглощение пенополистирола.

Методы

В качестве объектов исследования выбран пенополистирол марок RAVATHERM XPS STANDARD (ТУ 2244-002-00259620-2013 и ПСБ-С 15У (ТУ 2244-007-04001508-96). В качестве компонентов огнезащитного состава были выбраны органосилоксан (полиэтилсилоксановая жидкость – 5, ГОСТ ГОСТ 13004) и натриевое жидкое стекло (ГОСТ 13078).

Основой методологии работы является ГОСТ 30402–96 "Материалы строительные. Методы испытаний на воспламеняемость".

Общий вид установки для проведения эксперимента и подробное описание результатов предварительных исследований приведены в статье [7]. На основании данных, полученных в ходе предварительного эксперимента, был сделан вывод о достаточной эффективности органосилоксана и жидкого стекла для защиты пенополистирола от огневого воздействия [8].

Результаты и обсуждения

Для оценки влияния компонентов покрытия пенополистирола на его воспламеняемость был проведен двухфакторный

эксперимент с использованием метода регрессионного анализа. Была построена математическая модель, описывающая зависимость времени достижения максимальной

температуры воспламенения от соответствующих концентраций компонентов.

Данная зависимость описывается в форме полинома второй степени в виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2. \quad (1)$$

Результаты исследования воспламеняемости пенополистирола марки ПСБ-С 15-У после обработки огнезащитными составами с различным содержанием органокси-

локсана и жидкого стекла представлены в табл. 1. Для наибольшей точности эксперимента проводилось по 5 параллельных испытаний.

Таблица 1

Параметр	Фактор	Номер эксперимента							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Содержание органосилоксана, %	X ₁	0	5	0	10	0	2,5	10	30
Содержание жидкого стекла, %	X ₂	0	0	5	0	10	2,5	30	10
Среднее время достижения максимальной температуры, с	Y _{ср}	180	246	206	286	236	241	242	265

Для нахождения оптимума функции отклика была решена система уравнений:

$$\begin{cases} 2(-0,53) + 0,08x_2 = -16,2, \\ 0,08x_1 + 2(-0,39)x_2 = -9,27, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} -1,06x_1 + 0,08x_2 = -16,2, \\ 0,08x_1 - 0,78x_2 = -9,27. \end{cases} \quad (3)$$

По итогам проведения регрессионного анализа была получена следующая зависимость:

$$y = 178 + 16,2x_1 + 9,27x_2 + 0,08x_1x_2 - 0,53x_1^2 - 0,39x_2^2. \quad (4)$$

Время достижения максимальной температуры при данных значениях факторов составляет 373 с (рис. 1).

Результаты исследования воспламеняемости пенополистирола марки RAVATHERM XPS STANDARD после обработки огнезащитными составами с различным содержанием органосилоксана и жидкого стекла представлены в табл. 2. Для наибольшей точности эксперимента проводилось по 5 параллельных испытаний.

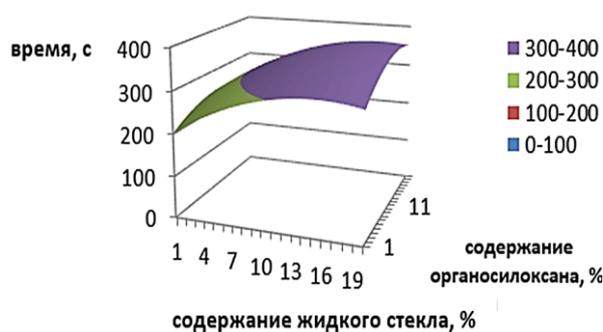


Рис. 1

Таблица 2

Параметр	Фактор	Номер эксперимента							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Содержание органосилоксана, %	X ₁	0	5	0	10	0	2,5	10	30
Содержание жидкого стекла, %	X ₂	0	0	5	0	10	2,5	30	10
Среднее время достижения максимальной температуры, с	Y _{ср}	154	180	166	218	177	186	175	215

Для определения оптимальных концентраций органосилоксана и жидкого стекла на основе экспериментальных данных была построена математическая модель, описывающая зависимость времени достижения максимальной температуры от соответствующих концентраций.

Данная зависимость искалась в форме полинома второй степени (формула (1)).

$$y = 152 + 8,5x_1 + 4,18x_2 - 0,06x_1x_2 - 0,22x_1^2 - 0,16x_2^2. \quad (7)$$

Время достижения максимальной температуры при данных значениях факторов составит 249 с (рис. 2).

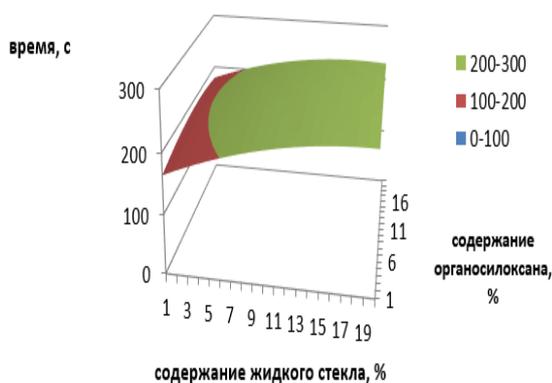


Рис. 2

После проведения двухфакторного эксперимента была проведена проверка основных свойств пенополистирола с нанесенным огнезащитным составом. По результатам данной проверки было установлено, что показатель водопоглощения пенополистирола не изменяется. При проверке теплопроводности пенополистирола с нанесенным огнезащитным составом результаты колебались в пределах 0,028...0,037

Для нахождения оптимума функции отклика была решена система уравнений:

$$\begin{cases} 2(-0,22)x_1 - 0,06x_2 = -8,5, \\ -0,06x_1 + 2(-0,16)x_2 = -4,18, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} -0,44x_1 - 0,06x_2 = -8,5, \\ -0,06x_1 - 0,32x_2 = -4,18. \end{cases} \quad (6)$$

По итогам проведения регрессионного анализа была получена следующая зависимость:

Вт/(м·°С), что практически не уступает изначальным параметрам (0,035...0,043 Вт/(м·°С)).

Таким образом, по результатам обработки данных, полученных в ходе двухфакторного эксперимента, направленного на определение оптимальной концентрации огнезащитного состава, применение которого положительно сказывается на увеличении времени воспламеняемости и уменьшении времени горения пенополистирольной плиты, можно сформулировать следующие выводы. Наибольшая эффективность по защите пенополистирола марки ПСБ-С 15-У достигается путем применения огнезащитного состава со следующим процентным содержанием веществ: органосилоксан – 16%, жидкое стекло – 14%. Наибольшая эффективность по защите пенополистирола марки RAVATHERM XPS STANDARD достигается путем применения огнезащитного состава со следующим процентным содержанием веществ: органосилоксан – 18%, жидкое стекло – 10%.

Более подробно результаты двухфакторного эксперимента приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметр	Компоненты огнезащитного состава		Эффект от применения состава (время, с)
	органосилоксан	жидкое стекло	
Воспламеняемость	16 %	14 %	373
	18 %	10 %	249

Результаты двухфакторного эксперимента показали, что наибольшая эффективность достигается путем применения огнезащитного состава со следующим процентным содержанием веществ: органосилоксан – 16...18%, жидкое стекло – 10...14%. Положительного эффекта удалось достичь благодаря применению в составе таких компонентов, как органосилоксан и жидкое стекло.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Акулова М.В., Мочалов А.М., Лебедев Д.В., Родионов Е.Г. О безопасности самозатухающего пенополистирола // Сб. мат. Междунар. научн.-практ. конф.: Современные пожаробезопасные материалы и технологии. Иваново 20-21 сентября 2017 года. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – 2017. С. 9...12.

2. Guidelines for the use of expanded foam polystyrene panel systems in industrial buildings so as to minimise the risk of fire // (Fire Engineering Research Report 06/1/2006, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Private Bag 4800 Christchurch, New Zealand).

3. Дашко Л.В., Елисеева И.А., Дашко И.В., Пономарева Н.Г. Анализ патентов и материалов заявок на изобретения, связанных с огнезащитой пенополистирола // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. Том 25, Вып. 1. С. 17...25.

4. Кетов А.А., Красновских М.П., Максимович Н.Г. Пожарная опасность самозатухающего пенополистирола // Пожарная безопасность. – 2014. Вып. 1. С. 54...59.

5. Машкин Н.А., Крутасов Б.В., Бернацкий А.Ф., Крутасова И.Б., Ларичкин В.В. Применение кремнийорганических модификаторов для защиты памятников деревянного зодчества // Изв. вузов. Строительство. – 2013, № 10. С. 11...17.

6. Шевченко В.Я., Блатов В.А., Илюшин Г.Д. Структурная химия органосилоксанов: состав и строение кластеров $SI N(O,C) M (N = 2-21)$ с мостиковыми связями $SI-O-SI$ // Физика и химия стекла. – 2014. Т. 40, №2. С. 234...243.

7. Акулова М.В., Мочалов А.М. О результатах исследования влияния огнезащитных составов на основе органосилоксанов на воспламеняемость пенополистирола // Современные проблемы гражданской защиты (Предыдущее название "Вестник Воронежского института ГПС МЧС России"). – Вып. 2 (31), 2019. С. 48...55.

8. Mochalov A.M., Akulova M.V., Sokolova J.A. and Sokolova A.G. New flame-retardant composition for lowering contribution of expanded poly styrene to the

propagation of fire // XXXIX RSP "Seminar Theoretical Basics of Construction". – Wrocław, Poland, 2020.

9. Федосов С.В., Акулова М.В., Слизнева Т.Е., Кокиаров С.А., Ахмадулина Ю.С., Соколова Ю.А. Применение механомагнитоактивированных водных растворов жидкого стекла для модифицирования мелкозернистых композитов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 6. С. 58...65.

10. Шустов Ю.С., Плеханова С.В., Шитова Т.И., Люкишинова И.В. Сравнение методик оценки распространения пламени на свойства специальной одежды // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 5. С. 63...67.

R E F E R E N C E S

1. Akulova M. V., Mochalov A.M., Lebedev D. V., Rodionov E. G. On the safety of self-extinguishing polystyrene foam // Modern fire-safe materials and technologies: Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference, Ivanovo, September 20-21, 2017 - Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2017. - pp. 9-12.

2. Guidelines for the use of expanded foam polystyrene panel systems in industrial buildings so as to minimise the risk of fire // (Fire Engineering Research Report 06/1/2006, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Private Bag 4800 Christchurch, New Zealand).

3. Dashko L.V., Eliseeva I.A., Dashko I.V., Ponomareva N.G., Analysis of patents and materials of applications for inventions related to fire protection of expanded polystyrene // Fire and explosion safety - Volume 25, Issue 1. - 2016 - pp. 17-25.

4. Ketov A. A., Krasnov M. P., M. N. G. Fire danger self-extinguishing expanded polystyrene // Fire safety Issue. 1, 2014 – p. 54-59.

5. Mashkin N. A., Krutikov B. V., Bernatsky A. F., Krutikova I. B., V. V. Larichkin the Use of silicone modifiers for the protection of monuments of wooden architecture // News of higher educational institutions. Construction. 2013. No. 10. pp. 11-17.

6. Shevchenko V.Ya., Blatov V.A., Ilyushin G.D. Structural chemistry of organosiloxanes: composition and structure of $SI N(O,C) M (N = 2-21)$ clusters with $SI-O-SI$ bridging bonds // Physics and chemistry of glass. 2014. Volume 40, No. 2. pp. 234-243.

7. M.V. Akulova, A.M. Mochalov On the results of the study of the effect of flame retardants based on organosiloxanes on the flammability of polystyrene foam // Journal Modern Problems of Civil Protection (Previous title "Bulletin of the Voronezh Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia"). - Issue 2 (31). - 2019 - pp. 48-55.

8. A M Mochalov, M V Akulova, J A Sokolova and A G Sokolova New flame-retardant composition for lowering contribution of expanded poly styrene to the

propagation of fire // XXXIX RSP «Seminar Theoretical Basics of Construction», Wrocław, Poland, 2020.

9. S. V. Fedosov, M. V. Akulova, T.E. Slizneva, S. A. Koksharov., Y. S. Akhmadulina, Yu. A. Sokolova Application machinemanufacturer aqueous liquid glass for modification of fine-grained composites // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2016. No. 6 (366). pp. 58-65.

10. Yu.S. Shustov, S.V. Plekhanova, T.I. Shitova, I.V. Lyukshinova Comparison of methods for assessing

the spread of flame on the properties of special clothing // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. No. 5 (395). pp. 63-67.

Рекомендована кафедрой государственного надзора и экспертизы пожаров (в составе УНК "Государственный надзор"). Поступила 28.12.21.