

УДК 691.175.5/.8

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 81.09.00

Научная специальность ВАК: 2.6.17 Материаловедение (технические науки)

EDN VGLOYK

DOI 10.62980/2076-0655-2025-62-73

ТЕРМОСТОЙКОСТЬ И ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ЗАЛИВОЧНЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПЕНОПЛАСТОВ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ушков М.В.¹, Евтушенко Ю.М.², Агафонова Н.З.¹, Ушков В.А.¹, Самченко С.В.¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

²Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук

АННОТАЦИЯ

Среди полимерных теплоизоляционных материалов на основе реакционноспособных олигомеров особое место занимают эпоксидные пенопласты, обладающие высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками. Однако высокая горючесть пенополиэпоксидов существенно сдерживает их применение в строительной индустрии. Цель работы – разработка заливочных эпоксидных пенопластов, обладающих пониженной горючестью и высокими физико-механическими показателями. Задачи исследования: установить влияние химической природы и содержания аддитивных и реакционноспособных бром- и фосфорсодержащих соединений на термостойкость, горючесть, технологические и эксплуатационные свойства эпоксидных пенопластов и разработка заливочных пенополиэпоксидов пониженной горючести с высокими физико-механическими характеристиками. Термические свойства пенополиэпоксидов определяли с помощью мультимодульного термоаналитического комплекса DuPont-9900. Представлены данные о влиянии кажущейся плотности пенопластов и концентрации кислорода в потоке окислителя на скорость распространения пламени по горизонтальной поверхности пенополиэпоксидов. Показано, что химическая природа аминных отвердителей незначительно влияет на термостойкость и горючесть эпоксидных пенопластов. Выявлено, что фосфатные пластификаторы являются малоэффективными антипиренами для пенополиэпоксидов, а химическое строение аддитивных броморганических антипиренов незначительно влияет на их эффективность. Показано, что микрокапсулированные антипирены уступают по эффективности пламягасящего действия аддитивным антипиренам. Установлено, что эффективными антипиренами для получения пенополиэпоксидов пониженной горючести являются фосфорсодержащий олигоэфирметакрилат и эпоксидированные отходы производства тетрабромдифенилолпропана.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: антипирены, горючесть, кажущаяся плотность, кислородный индекс, модификаторы, пенополиэпоксиды, пластификаторы, прочность, скорость распространения пламени, термостойкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ушков М.В. Термостойкость и пожарная опасность заливочных эпоксидных пенопластов строительного назначения М.В. Ушков, Ю.М. Евтушенко, Н.З. Агафонова, В.А. Ушков, С.В. Самченко // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 1. – С. 62- 73, DOI 10.62980/2076-0655-2025-62-73, EDN VGLOYK

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

PM MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY

EDN VGLOYK

DOI 10.62980/2076-0655-2025-62-73

HEAT RESISTANCE AND FIRE HAZARD OF Poured EPOXY FOAMS FOR CONSTRUCTION PURPOSES

Ushkov M.V.¹, Evtushenko Y.M.², Agafonova N.Z.¹, Ushkov V.A.¹, Samchenko S.V.¹

¹Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University

²Institute of Synthetic Polymeric Materials named after N.S. Enikolopov of the Russian Academy of Sciences

ABSTRACT

Epoxy foams with their high technologic parameters and performance characteristics have a special place in a field of polymer insulation materials based on reactive oligomers. However, polyepoxy foams are highly flammable, which significantly limits their use in the construction industry. The purpose of the work is to develop effective methods for reducing the flammability of cast epoxy foams and increasing physical and mechanical properties. Research objectives: to establish the influence of the chemical nature and content of additive and reactive bromine- and phosphorus-containing compounds on the heat resistance, flammability and performance properties of cast epoxy foams and to develop low-flammability polyepoxy foams with high physical and mechanical characteristics. The thermal properties of epoxy foams were studied using a DuPont-9900 multimodular thermal analytical complex. Experimental data on the influence of the apparent density of polyepoxy foams and the oxygen concentration in the oxidizer flow on the speed of flame propagation along the horizontal surface of polyepoxy foams are presented. It was revealed that the chemical nature of amine hardeners has virtually no effect on the heat resistance and flammability of polyepoxy foams. It has been established that phosphate plasticizers are ineffective flame retardants for polyepoxy foams, and the chemical structure of additive organobromine flame retardants has little effect on their effectiveness. It has been shown that microencapsulated flame retardants are inferior in flame extinguishing efficiency to additive flame retardants. It was revealed that effective flame retardants for casting polyepoxy foams are phosphorus-containing oligoester methacrylate and epoxidized waste from the production of tetra-bromdiphenylol propane.

KEY WORDS: flame retardants, flammability, apparent density, oxygen index, modifiers, polyepoxy foams, plasticizers, strength, flame spread rate, heat resistance

FOR CITATION: Ushkov M.V., Evtushenko Y.M., Agafonova N.Z., Ushkov V.A., Samchenko S.V. Heat resistance and fire hazard of poured epoxy foams for construction purposes // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol. – 32, No1. – Pp. C. 62- 73, DOI 10.62980/2076-0655-2025-62-73, EDN VGLOYK

ВВЕДЕНИЕ

Введение жестких нормативов к тепловой защите зданий и сооружений, тепловой изоляции технологического оборудования, регламентированных СП 50.13330.2012 и СП 61.13330.2012, привело к необходимости применения в строительной индустрии эффективных полимерных теплоизоляционных материалов (пенопластов) [1]. Пенопласты на основе термопластичных и термореактивных полимеров обладают низкими кажущейся плотностью ($15 \dots 200 \text{ кг/м}^3$) и теплопроводностью ($0,022 \dots 0,055 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$), широким температурным интервалом применения (от -50 до $+150^\circ\text{C}$), хорошим сочетанием прочности и плотности [2 – 7]. Полимерные теплоизоляционные материалы (ПТМ) повышают надежность и долговечность строительных конструкций, снижают потери тепла, увеличивают производительность и улучшают условия труда при выполнении строительно-монтажных работ. Требуемый диапазон плотностей ПТМ определяется областью их применения.

ПТМ могут быть изготовлены практически из любого полимера, выбор которого определяется требуемыми технологическими и эксплуатационными характеристиками ПТМ, а также экономичностью процесса производства теплоизоляционных изделий на их основе. Эксплуатационные свойства пенопластов зависят от химической природы полимерной матрицы и дисперсной фазы, пористости, размера и формы пор, технологии производства теплоизоляционных изделий [2,3,4,7]. При этом, пенопласты на основе реакционноспособных олигомеров обладают более высокой прочностью, термостойкостью и химической стойкостью по сравнению с газонаполненными термопластичными полимерами.

К пенопластам на основе реакционноспособных олигомеров относятся и пенополиэпоксиды (ППЭ), синтезируемые на основе эпоксидных и эпокси-новолачных смол с добавлением легколетучих углеводородов в качестве вспенивающих агентов и ди- и полиаминов в качестве отвердителей [4,5,7]. Для повышения теплостойкости ППЭ в качестве отвердителей используют ароматические полиамины (фенилендиамин, диаминодифенилметан), а в качестве катализаторов отверждения - комплексы трехфтористого бора со спиртами, эфирами или аминами. В качестве вспенивающего агента при производстве ППЭ чаще всего применяют хладоны (фреоны). Большинство пенополиэпоксидов являются жесткими пенопластами с закрытоячейковой структурой [4, 5, 7].

Преимуществом ППЭ являются высокие прочность, тепло- и звукоизоляционные свойства, диэлектрические характеристики, термостойкость и широкий интервал рабочих температур (от -50 до $+150^\circ\text{C}$), химическая стойкость, низкое водопоглощение (за исключением открытопористых пеноэпоксидов) и высокая адгезия к различным подложкам. ППЭ в строительстве применяют в качестве тепло- и звукоизоляционного материала при производстве сэндвич-панелей и кровельных теплоизоляционных плит. Эпоксидные смолы также используют для получения электроизоляционных материалов в радиотехнике, в производстве конструкционных изделий в авиационной, автомобильной, судостроительной и приборостроительной промышленности. Эксплуатационные свойства, основные методы модификации и усиления эпоксидных полимеров и композитов на их основе рассмотрены в работах [8 – 10].

INTRODUCTION

Introduction of strict standards for thermal protection of buildings and structures, thermal insulation of technological equipment, regulated by SP 50.13330.2012 and SP 61.13330.2012, has led to the need to use in the construction industry effective polymeric thermal insulation materials (foams) [1]. Foams based on thermoplastic and thermosetting polymers have low apparent density ($15 \dots 200 \text{ kg/m}^3$) and thermal conductivity ($0.022 \dots 0.055 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$), wide temperature range of application (from -50 to $+150^\circ\text{C}$), good combination of strength and density [2-7]. Polymer thermal insulation materials (PTM) increase the reliability and durability of building structures, reduce heat losses, increase productivity and improve working conditions during construction and installation works. The required range of PTM densities is determined by the area of their application.

PTMs can be made practically from any polymer, the choice of which is determined by the required technological and operational characteristics of PTMs, as well as the cost-effectiveness of the production process of thermal insulation products based on them. The performance properties of foams depend on the chemical nature of the polymer matrix and dispersed phase, porosity, pore size and shape, and the production technology of thermal insulation products [2,3,4,7]. At the same time, the foams based on reactive oligomers have higher strength, heat and chemical resistance compared to gas-filled thermoplastic polymers.

The foams based on reactive oligomers include polyepoxide foams (PEF) synthesized on the basis of epoxy and epoxy resins with the addition of volatile hydrocarbons as foaming agents and di- and polyamines as curing agents [4,5,7]. Aromatic polyamines (phenylenediamine, diaminodiphenylmethane) are used as hardeners to increase heat resistance of PEF, and complexes of boron trifluoride with alcohols, esters or amines are used as curing catalysts. Chladones (freons) are most often used as a foaming agent in the production of PEF. Most polyepoxide foams are rigid foams with closed cell structure [4,5,7].

The advantages of PEFs are high strength, thermal and acoustic insulation properties, dielectric characteristics, heat resistance and a wide operating temperature range (-50 to $+150^\circ\text{C}$). They also have chemical resistance and high adhesion to various substrates. PEFs are characterized by low water absorption except for open-porous epoxy foams. PEF is used in construction as a heat and sound insulating material in the production of sandwich panels and roof insulation boards. Epoxy resins are also used for production of electrical insulating materials in radio engineering, in production of structural products in aviation, automotive, shipbuilding and instrumentation industries. Operational properties, basic methods of modification and reinforcement of epoxy polymers and composites based on them are considered in [8-10].

In Russia, two main methods of polyepoxy foam production have been developed: PE grade - foaming of

В России разработаны два основных способа получения пенополиэпоксидов: марки ПЭ – вспенивание пенопластов происходит при повышенных температурах и марки ПЭП – вспенивание при температуре 20-25°C. Эпоксидные пенопласты марок ПЭ-1, ПЭ-2, ПЭ-2Т, ПЭ-3, ПЭ-5, получают в результате вспенивания и отверждения эпоксидной смолы марки ЭД-16 с помощью аминных отвердителей. Пенопласты марок ПЭ-1, ПЭ-2, ПЭ-2Т и ПЭ-3 вспенивают с помощью порофора ЧХЗ-57, а ПЭП марки ПЭ-5 – с помощью хладона-113 (ручная заливка) или хладона-142 (машинная заливка). Пенопласты марки ПЭ-6 получают вспениванием эпоксидной смолы марки ЭД-16 хладона-113, отверждая ее с помощью катализаторов катионной полимеризации.

Следует отметить, что подавляющее большинство отечественных эпоксидных композитов (в том числе ПТМ) обладают повышенной пожарной опасностью (горючестью, дымообразующей способностью и токсичностью продуктов пиролиза и горения) [11 – 13]. О важности снижения пожарной опасности полимерных композиционных материалов (ПКМ) и огнезащиты различных строительных конструкций на их основе свидетельствуют многочисленные обзоры научно-технической литературы, опубликованные за последние 5-6 лет, тематика которых охватывает практически все вопросы пожаробезопасного применения ПКМ [14 – 20]. Горючесть эпоксидноволачных пенопластов рассмотрена в работе [21]. Поэтому, снижение горючести эпоксидных пенопластов строительного назначения является актуальной задачей.

Целью данной исследовательской работы является разработка заливочных эпоксидных пенопластов, обладающих пониженной горючестью и высокими физико-механическими показателями.

Задачи исследования: установить влияние химической природы и содержания аддитивных и реакционноспособных бром- и фосфорсодержащих соединений на термостойкость, горючесть, технологические и эксплуатационные свойства эпоксидных пенопластов и разработка заливочных пенополиэпоксидов пониженной горючести с высокими физико-механическими характеристиками.

Материалы и методы исследования

Заливочные эпоксидные пенопласты получали на основе диановой эпоксидной смолы марки ЭД-20 (ГОСТ Р 56211-2014). В качестве аминного отвердителя использовали смесь полиэтиленполиамин направленного синтеза (полиаминоалкилимидазолин) марки УП-0641Д (ТУ 6-05-241-202-82) и полиэтиленполиамин (ПЭПА, ТУ 2413-010-75678843-2012) в соотношении 4:1. В качестве химического вспенивающего агента при получении ПЭП применяли кремнийорганическую гидрофобизирующую жидкость марки 136-41 (ГОСТ 10834-76), а в качестве ПАВ – кремнийорганическое соединение марки КЭП-2А (ТУ 20.14.51-309-00209013-2020). Для снижения горючести эпоксидных пенопластов использовали фосфатные пластификаторы (трикрезилфосфат, дифенил(2-этилгексил)фосфат, ди(2-этилгексил)фенилфосфат (ТУ 6-06-241-92), дифенилизопропилфосфат (ТУ 6-05-211-1211-80), трихлорпропилфосфат (ТУ 2493-513-05763441-2007), и хлорированный парафин марки Парахлор-380 (ТУ 2493-005-1316440-92). В качестве аддитивных броморганических антипиренов применяли гексабромбензол, тетрабромдифенилолпропан, тетрабромфталевый ангидрид, декабромдифенилоксид и N(2,4,6-трибромфенил) маленимид, а в качестве реакционноспособных антипиренов –

foams occurs at elevated temperatures and PEP grade - foaming at 20-25°C. Epoxy foams of PE-1, PE-2, PE-2T, PE-3, PE-5 grades are obtained by foaming and curing of ED-16 epoxy resin with amine hardeners. Foams of PE-1, PE-2, PE-2T and PE-3 grades are foamed with the help of ChKhZ-57 porophore, and PE-5 PPE is foamed with the help of Hladon-113 (manual pouring) or Hladon-142 (machine pouring). PE-6 foam plastics are produced by foaming ED-16 epoxy resin with refrigerant-113, curing it with cationic polymerization catalysts.

It should be noted that the vast majority of domestic epoxy composites (including PTM) have increased fire hazard (flammability, smoke-forming ability and toxicity of pyrolysis and combustion products) [11-13]. The importance of reducing the fire hazard of polymer composite materials (PCM) and fire protection of various building structures on their basis is evidenced by numerous reviews of scientific and technical literature published over the last 5-6 years, the topics of which cover almost all the issues of fire-safe application of PCM [14-20]. The flammability of epoxy-based foams is reviewed in [21]. Therefore, reducing the flammability of epoxy foams for construction purposes is an urgent task.

The purpose of this research work is to develop casting epoxy foams with reduced flammability and high physical and mechanical properties.

Research objectives: to establish the influence of chemical nature and content of additive and reactive bromo- and phosphorus-containing compounds on thermal stability, flammability, technological and operational properties of epoxy foams and development of casting polyepoxy foams of reduced flammability with high physical and mechanical characteristics.

Materials and methods of research

Filling epoxy foams were prepared on the basis of ED-20 dian epoxy resin (GOST R 56211-2014). As an amine hardener a mixture of polyethylene polyamine of directed synthesis (polyaminoalkylimidazoline) of UP-0641D grade (TU 6-05-241-202-82) and polyethylene polyamine (PEPA, TU 2413-010-75678843-2012) in the ratio 4:1 was used. Organosilicon hydrophobizing liquid of 136-41 grade (GOST 10834-76) was used as a chemical foaming agent to obtain PPE, and organosilicon compound of KEP-2A grade (TU 20.14.51-309-00209013-2020) was used as a surfactant. Phosphate plasticizers (tricresyl phosphate, diphenyl(2-ethylhexyl)phosphate, di(2-ethylhexyl)phenyl phosphate (TU 6-06-241-92), diphenylisopropyl phosphate (TU 6-05-211-1211-80), trichloropropyl phosphate (TU 2493-513-05763441-2007), and chlorinated paraffin Parachlor-380 (TU 2493-005-1316440-92). Hexabromobenzene, tetrabromodiphenylpropane, tetrabromophthalic anhydride, decabromodiphenyloxide and N(2,4,6-tribromophenyl)maleinimide were used as additive organobromine flame retardants, and as reactive flame retardants - bromine-containing epoxy resins of UP-631 (TU 2225-652-11131395-2008) and UP-645 (TU 6-05-241-40-82) grades, containing 46.2 and 50.8% of bromine, respectively, as well as epoxidized wastes of

бромсодержащие эпоксидные смолы марок УП-631 (ТУ 2225-652-11131395-2008) и УП-645 (ТУ 6-05-241-40-82), содержащие соответственно 46,2 и 50,8% брома, а также эпоксидированные отходы производства тетрабромдифенилпропана (ЭОТБДП), содержащие 44,3% брома и 10,5% эпоксидных групп. Для сравнения использовали фосфорсодержащий олигоэфирметакрилат (2-фосфоноксиэтилметакрилат), содержащий 14,3% фосфора.

Технологические параметры воспламенения и отверждения ППЭ определяли по общепринятым методикам, а их физико-механические показатели - в соответствии с требованиями действующих ГОСТов: кажущуюся плотность – по ГОСТ 409-2017 (ISO 845:2006), прочность при сжатии - ГОСТ 23206-2017 (ISO 844:2014), водопоглощение - ГОСТ 2869-2017 (ISO 2896:2001) и теплопроводность – по ГОСТ 7076-99.

Кислородный индекс (КИ), температуры воспламенения (T_v) и самовоспламенения (T_{cv}) определяли по ГОСТ 12.1.044-89. Предельную концентрацию кислорода ($c_{пр}$) и скорость распространения пламени (V_p) по горизонтальной поверхности при концентрации кислорода в потоке окислителя от 20 до 75% исследовали по методике работы [22], а критическую плотность теплового потока воспламенения ($q_{кр}$) - по методике работы [23].

Термические характеристики исследованных ППЭ определяли с помощью термоаналитического комплекса DuPont-9900 при нагревании образцов на воздухе со скоростью 10 и 20 °C/мин с учетом требования ГОСТ 53293-2009. Критериями термостойкости эпоксидных пенопластов являлись температуры начала интенсивного разложения ($T_{нр}$) и максимальной скорости разложения (T_{max}).

Эксперименты и обсуждение результатов

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что термостойкость и горючесть исследованных заливочных эпоксидных пенопластов практически не зависит от химической природы аминного отвердителя: $T_{нр}$ составляет 230-240°C, T_{max} наблюдается при температуре 330-340°C, а КИ равен 19,2-19,7%. С ростом скорости нагрева образцов пенопластов с 10 до 20 °C/мин $T_{нр}$ полиэпоксидов незначительно возрастает – с 240 до 250°C. Скорость распространения пламени по горизонтальной поверхности ППЭ зависит от концентрации кислорода в потоке окислителя (рис. 1) и плотности пенопласта (рис. 2).

Концентрация оксидов углерода в продуктах пиролиза эпоксидных пенопластов при температуре 450-750°C незначительно зависит от содержания отверждающего агента в исходной композиции и составляет:

CO/CO₂, объемн.%
 450°C - 0,25 - 0,26 / 0,42 - 0,46;
 600°C - 0,75 - 1,00 / 8,00 - 12,20;
 750°C - 0,20 - 0,25 / 16,50 - 16,90

При этом максимальный выход CO реализуется при температуре 600°C. Приведенные выше данные свидетельствуют в повышенной пожарной опасности и вследствие этого токсичности заливочных ППЭ, что существенно ограничивает их применение в строительной индустрии.

tetrabromodiphenylpropane production (EOTBDP), containing 44.3% of bromine and 10.5% of epoxy groups. Phosphorus-containing oligoether methacrylate (2-phosphonoxyethyl methacrylate) containing 14.3% phosphorus was used for comparison.

Technological parameters of ignition and curing of PPE were determined according to generally accepted methods, and their physical and mechanical parameters were determined in accordance with the requirements of the current State Standards: apparent density - according to GOST 409-2017 (ISO 845:2006), compressive strength - GOST 23206-2017 (ISO 844:2014), water absorption - GOST 2869-2017 (ISO 2896:2001) and thermal conductivity - according to GOST 7076-99.

Oxygen index (OI), ignition temperature (T_v) and autoignition temperature (T_{sv}) were determined according to GOST 12.1.044-89. The limiting oxygen concentration (c_{pr}) and flame propagation velocity (V_p) on a horizontal surface at oxygen concentration in the oxidizer stream from 20 to 75% were investigated according to the method of work [22], and the critical density of the ignition heat flux (q_{kr}) - according to the method of work [23].

The thermal characteristics of the studied PPE were determined using DuPont-9900 thermoanalytical complex when the samples were heated in air at a rate of 10 and 20 °C/min, taking into account the requirements of GOST 53293-2009. Temperature of the beginning of intensive decomposition (T_{nr}) and maximum decomposition rate (T_{max}) were the criteria of epoxy foam thermal resistance.

Experiments and discussion

As a result of the performed experimental studies, it was found that the heat resistance and flammability of the investigated casting epoxy foams are practically independent of the chemical nature of the amine hardener: T_{nr} is 230-240°C, T_{max} is observed at 330-340°C, and KI is 19.2-19.7%. As the heating rate of the foam samples increases from 10 to 20°C/min, the T_{nr} of the polyepoxy foams increases slightly from 240 to 250°C. The flame propagation rate along the horizontal surface of the PPE depends on the oxygen concentration in the oxidizer stream (Fig. 1) and the density of the foam (Fig. 2).

The concentration of carbon oxides in the pyrolysis products of epoxy foams at 450-750°C does not depend significantly on the content of curing agent in the initial composition and is:

At the same time, the maximum CO yield is realized at a temperature of 600°C. The above data indicate the increased fire hazard and consequent toxicity of filler foam, which significantly limits their use in the construction industry.

РИСУНОК 1

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЕНОПЛАСТОВ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В ПОТОКЕ ОКИСЛИТЕЛЯ И КАЖУЩЕЙСЯ ПЛОТНОСТИ ППЭ:

1 – 90,3 кг/м³, 2 – 115,2 кг/м³, 3 – 164,4 кг/м³,
4 – 172,1 кг/м³, 5 – 250,6 кг/м³, 6 – 315,6 кг/м³

Figure 1

Dependence of flame propagation velocity along the horizontal surface of foams of different densities on the oxygen concentration in the oxidizer flow and apparent density of PPE:

1 – 90.3 kg/m³, 2 – 115.2 kg/m³, 3 – 164.4 kg/m³,
4 – 172.1 kg/m³, 5 – 250.6 kg/m³, 6 – 315.6 kg/m³

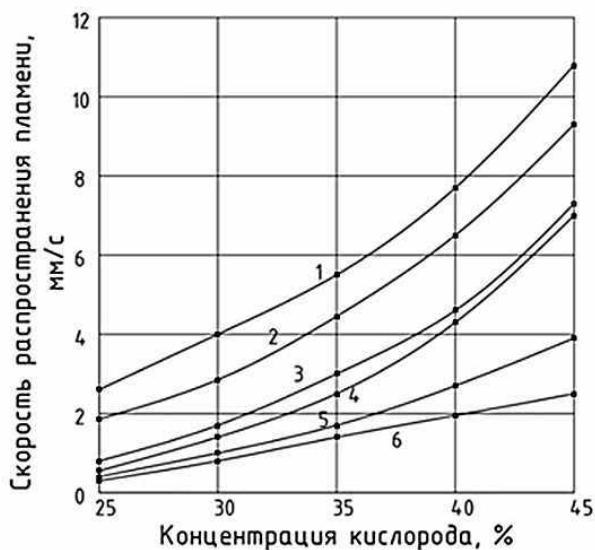


Рисунок 2

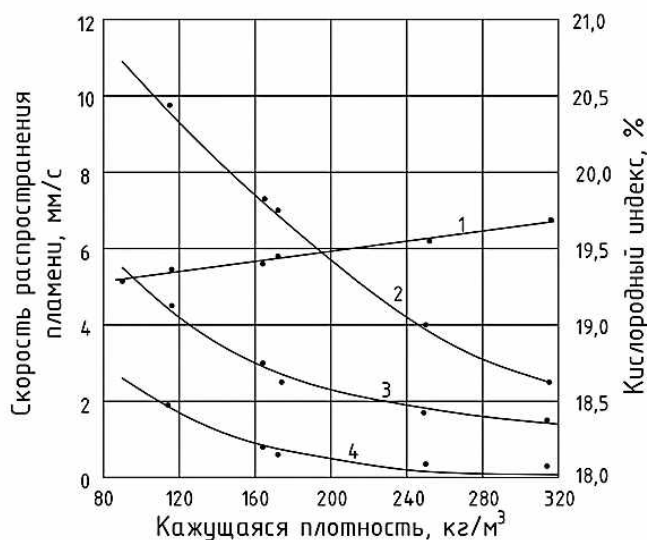
ЗАВИСИМОСТЬ КИСЛОРОДНОГО ИНДЕКСА (1) И СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ (2, 3, 4) ЗАЛИВОЧНЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПЕНОПЛАСТОВ ОТ ИХ КАЖУЩЕЙСЯ ПЛОТНОСТИ И КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В ПОТОКЕ ОКИСЛИТЕЛЯ:

2 – 45%; 3 – 40%, 4 – 35%.

Figure 2

Dependence of oxygen index (1) and flame propagation velocity along the horizontal surface (2, 3, 4) of poured epoxy foams on their apparent density and oxygen concentration in the oxidizer flow:

2 – 45%; 3 – 40%, 4 – 35%.



Для улучшения технологических свойств и повышения эксплуатационных характеристик эпоксидных связующих используют органические эфиры ортофосфорной кислоты и жидкие хлорированные парафины [10, 24]. Хлорпарафины являются слабо полярными веществами, имеющими полярную группу (хлор) и неполярный углеводородный скелет, что позволяет им хорошо совмещаться со смолой ЭД-20 с образованием однородной композиции. В результате проведенных исследований установлено, что фосфатные пластификаторы и хлорированные парафины (Парахлор-380) незначительно влияют на технологические свойства заливочных ППЭ (время старта и продолжительность вспенивания составляют соответственно 160-180 с. и 14-18 мин.), а температура в блоке не превышает 90°C. Однако, пластификаторы снижают вязкость исходной композиции, что ухудшает микроструктуру пен.

Горючесть исследованных ППЭ практически не зависит от химического строения фосфатных пластификаторов: КИ пенопластов, содержащих 6,9 мас.% эфиров

Organic esters of orthophosphoric acid and liquid chlorinated paraffins are used to improve the technological properties and increase the performance characteristics of epoxy binders [10,24]. Chlorinated paraffins are weakly polar substances having a polar group (chlorine) and a nonpolar hydrocarbon skeleton, which allows them to combine well with ED-20 resin to form a homogeneous composition. As a result of the research, it was found that phosphate plasticizers and chlorinated paraffins (Parachlor-380) have an insignificant effect on the technological properties of the casting RPE (the start time and duration of foaming are 160-180 s. and 14-18 min. respectively), and the temperature does not exceed 90°C. and 14-18 min.), and the temperature in the block does not exceed 90°C. However, plasticizers reduce the viscosity of the initial composition, which deteriorates the foam microstructure.

The flammability of the investigated RPE is practically independent of the chemical structure of phosphate

ортофосфорной кислоты, равен 19,5-21,2%, а $q_{кр} = 18,3 - 19,3$ кВт/м² (таблица 1). Влияние содержания указанных пластификаторов на воспламеняемость ППЭ показано на рисунке 3.

plasticizers: the CI of foams containing 6.9 wt.% of ortho-phosphoric acid esters is 19.5-21.2%, and $q_{kr}=18.3-19.3$ kW/m² (Table 1). The effect of the content of the above plasticizers on the flammability of RPE is shown in Figure 3.

ТАБЛИЦА 1 – ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ТЕРМОСТОЙКОСТЬ И ГОРЮЧЕСТЬ ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ (6,9 МАС.%) ЗАЛИВОЧНЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПЕНОПЛАСТОВ
Table 1 - Physical and mechanical properties, heat resistance and flammability of plasticized (6.9 wt.%) poured epoxy foams

Показатели Indicators	Марка пластификатора Grade of plasticizer				
	Трихлорпропилфосфат	Дифенил (2-этилгексил) - фосфат	Ди (2-этилгексил) - фенилфосфат	Дифенилизо-пропилфенил-фосфат	Трикрезил-фосфат
Концентрация фосфора, мас. %, в: пластификаторе	9,47	8,55	7,78	8,42	9,50
пенопласте	0,65	0,59	0,54	0,58	0,66
Кажущаяся плотность, кг/м ³	195	201	200	220	229
Разрушающее напряжение при сжатии, кПа	1650	1710	1700	1670	1550
Водопоглощение за 24 часа, объемн. %	3,8	3,9	4	3,7	3,9
Температура начала интенсивного разложения, °С	217	216	215	220	224
Кислородный индекс, %	21,2	19,7	19,5	19,8	19,7

РИСУНОК 3

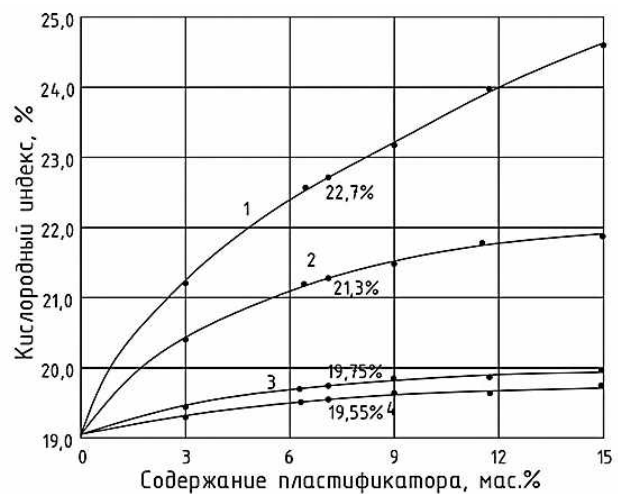
ЗАВИСИМОСТЬ КИСЛОРОДНОГО ИНДЕКСА ЗАЛИВОЧНЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПЕНОПЛАСТОВ ОТ СОДЕРЖАНИЯ ПЛАСТИФИКАТОРОВ:

- 1 – хлорпарафин марки Парахлор-380;
- 2 – трихлорпропилфосфат;
- 3 – дифенил (2-этилгексил) фосфат;
- 4 – ди (2-этилгексил) фенилфосфат.

Figure 3

Dependence of oxygen index of poured epoxy foams on the content of plasticizers:

- 1 - Parachlor-380 chloroparaffin;
- 2 - trichloropropyl phosphate;
- 3 - diphenyl (2-ethylhexyl) phosphate;
- 4 - di (2-ethylhexyl) phenyl phosphate.



Данные таблицы 1 и рисунка 3 подтверждают выводы работ [25,26], что эфиры ортофосфорной кислоты являются малоэффективными антипиренами ПКМ. Из исследованных органических эфиров ортофосфорной кислоты высокий пластифицирующий эффект проявляет дифенил (2-этилгексил) фосфат, обладающий хорошей совместимостью с эпоксидным олигомером.

Более высокой эффективностью пламягасящего действия обладает хлорированный парафин марки Парахлор-380 (рисунок 3). Механизм ингибирования горения ППЭ в его присутствии обусловлен флегматизацией пламени и снижением концентрации активных радикалов (H, OH и

The data of Table 1 and Figure 3 confirm the conclusions of [25,26] that orthophosphoric acid esters are ineffective flame retardants for PCM. Of the studied organic esters of orthophosphoric acid, diphenyl (2-ethylhexyl) phosphate shows a high plasticizing effect and has a good compatibility with the epoxy oligomer.

Parachlor-380 chlorinated paraffin has a higher flame-extinguishing efficiency (Figure 3). The mechanism of combustion inhibition of PPE in its presence is due to flame phlegmatization and reduction of the concentration of active radicals (H, ON and O·) due to their interaction with the dehydrochlorination product of chloroparaffin -

О) за счет их взаимодействия с продуктом дегидрохлорирования хлорпарафина – HCl. При этом КИ возрастает до 24,6 (рисунок 3), а q_{kr} равен 22,3-23,5 кВт/м². Кроме того, Парахлор-380 повышает деформационные характеристики и снижает водопоглощение ППЭ: по водостойкости пенопласты, пластифицированные хлорпарафином марки Парахлор-380, превосходят ППЭ, модифицированными другими соединениями. Следует отметить, что Парахлор-380 снижает термостойкость ППЭ (рисунок 4), и практически не влияет на выход оксидов углерода при разложении пенопластов в интервале температур 450-750°C.

РИСУНОК 4

ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ ЗАЛИВочНЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПЕНОПЛАСТОВ Пониженной ГОРЮЧЕСТИ:

- 1 – без антипирена;
- 2 – N (2,4,6 – трибромфенил) маленимид;
- 3 – декабромдифенилоксид;
- 4 – тетрабромдифенилолпропан;
- 5 – хлорированный парафин марки «Парахлор-380».

Figure 4

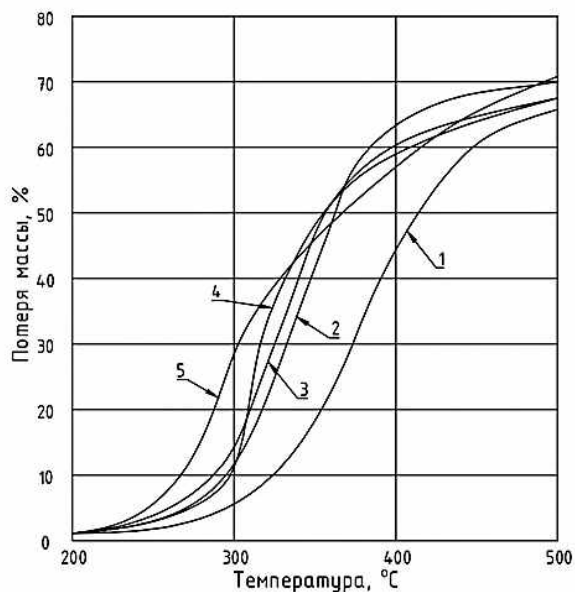
Thermogravimetric curves of pouring epoxy foams of lower flammability:

- 1 – without flame retardant;
- 2 - N (2,4,6 - tribromophenyl) maleinimide;
- 3 - decabromodiphenyloxyde;
- 4 - tetrabromodiphenylopropane;
- 5 - chlorinated paraffin "Parachlor-380".

С повышением температуры пиролиза происходит закономерный рост концентрации CO и CO₂: при содержании в ППЭ 11,75 мас.%. Парахлор-308 концентрация CO и CO₂ возрастает соответственно с 0,025 и 0,4 объемн. % при 450°C до 2,25 и 15,5 объемн. % при 750°C. Максимальный выход CO₂, как и у исходного пенополиэпоксида, наблюдается при температуре 600°C. Эпоксидные пенопласты, пластифицированные Парахлор-380, относятся к материалам с высокой дымообразующей способностью $D_m > 500$ м²/г.

Для снижения горючести пенопластов на основе реакционноспособных олигомеров широко используют азотсодержащие органические соединения, разлагающиеся при нагревании с выделением азота, вызывающего флегматизацию пламени (например, порофор марки ЧХЗ-18). Однако в эпоксидных пенопластах порофор ЧХЗ-18 проявляет низкую эффективность. При его содержании до 11 мас.% КИ пенопластов возрастает с 19,5 до 23,1%, а кажущаяся плотность ППЭ повышается до 192 кг/м³ и, соответственно, возрастает прочность пенополиэпоксидов (разрушающее напряжение при сжатии увеличивается с 1,2 до 2,24 МПа). Аналогичный эффект достигается и при введении в исходную композицию 10 мас.% микрокапсулированного четыреххлористого углерода или хладона марки II 4В-2 с диаметром частиц < 160 мк (оболочка микрокапсул – поливиниловый спирт): КИ пенопластов равен 22,7-23,5% при плотности пен 215-235 кг/м³. Снижение горючести ППЭ в присутствии микрокапсулированных антипиренов обусловлено эффектом диспергирования полимера и

HCl. In this case, the KI increases to 24.6 (Figure 3), and q_{kr} is 22.3-23.5 kW/m². In addition, Parachlor-380 increases deformation characteristics and reduces water absorption of RPE: in terms of water resistance, foams plasticized with chloroparaffin of Parachlor-380 grade are superior to PPE modified with other compounds. It should be noted that Parachlor-380 reduces the thermal stability of PPE (Figure 4), and practically does not affect the yield of carbon oxides during the decomposition of foams in the temperature range of 450-750°C.



With the increase of pyrolysis temperature, the concentration of CO and CO₂ increases naturally: with the content of 11.75 wt% of Parachlor-308 in PPE, the concentration of CO and CO₂ increases from 0.025 and 0.4 vol% at 450°C to 2.25 and 15.5 vol% at 750°C, respectively. The maximum yield of CO₂, as with the original polyepoxy foam, is observed at 600°C. The epoxy foams plasticized with Parachlor-380 are among the materials with high smoke production capacity $D_m > 500$ м²/г.

To reduce the flammability of foams based on reactive oligomers, nitrogen-containing organic compounds are widely used, which decompose when heated with the release of nitrogen causing flame phlegmatization (e.g., porophor ChHZ-18). However, in epoxy foam plastics porophor ChKhZ-18 shows low efficiency. At its content of up to 11 wt.%, the KI of foams increases from 19.5 to 23.1%, and the apparent density of PPE increases up to 192 kg/m³ and, accordingly, the strength of polyepoxy foams increases (compressive failure stress increases from 1.2 to 2.24 MPa). A similar effect is achieved by introducing into the initial composition 10 wt.% of microencapsulated carbon tetrachloride or hladon II 4B-2 with particle diameter < 160 μ (microcapsule shell - polyvinyl alcohol): KI of foams is 22.7-23.5% at foam density of 215-235 kg/m³. The reduction of flammability of PPE in the presence of microencapsulated flame retardants is due to the effect of polymer dispersion and flame knockdown as a result of microcapsule rupture, phlegmatization and

сбивания пламени в результате разрыва микрокапсул, флегматизацией и ингибированием цепных реакций пламени продуктами разложения хладона или CCl₄.

Более высокой эффективностью пламягасящего действия обладают броморганические антипирены аддитивного типа (таблица 2), механизм ингибирования горения ПКМ в их присутствии рассмотрен в работах [27,28]. Из данных таблицы 2 следует, что при содержании броморганических антипиренов 6,25% мас.% КИ эпоксидных пенопластов возрастает до 25,1-25,3%, одновременно незначительно снижается термоокислительная стабильность ППЭ и повышается их T_{св} до 480-490°C. Влияние содержания броморганических антипиренов на горючесть заливочных ППЭ представлено на рисунке 5. Данные таблицы 2 и рисунка 5 показывают, что химическое строение аддитивных броморганических антипиренов незначительно влияет на их эффективность.

inhibition of flame chain reactions by decomposition products of hladone or CCl₄.

Organobromine flame retardants of additive type have higher flame retardant efficiency (Table 2), the mechanism of inhibition of PCM combustion in their presence is considered in [27,28]. It follows from the data in Table 2 that at the content of organobrominated anitipyrenes 6.25% wt.%, the KI of epoxy foams increases to 25.1-25.3%, at the same time, the thermo-oxidative stability of PCMs decreases slightly and their T_{sv} increases to 480-490°C. The effect of the content of organobromine flame retardants on the flammability of the casting EPS is shown in Figure 5. The data in Table 2 and Figure 5 show that the chemical structure of additive organobromine flame retardants has little effect on their performance.

ТАБЛИЦА 2 ГОРЮЧЕСТЬ ЗАЛИВОЧНЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПЕНОПЛАСТОВ, СОДЕРЖАЩИХ БРОМОРГАНИЧЕСКИЕ АНТИПИРЕНЫ

Table 2 Flammability of poured epoxy foams containing organobromine flame retardants

Показатели Indicators	Броморганические антипирены Organobrominated flame retardants				
	Гексабром- бензол	Тетра- бромдифе- нилол- пропан	Тетра- бромфта- левый ангидрид	N(2,4,6- трибромфе- нил)малеин- имид	Дека- бромдифе- нилоксид
Концентрация брома, мас. %, в:					
- антипирене;	85,5	58,5	67,5	58	82,5
- пенопласте	5,90	4,04	4,66	4,00	5,69
Кажущаяся плотность, кг/м ³	157,2	149,3	144,5	139,7	140,1
Кислородный индекс, %	24,7	25,0	24,0	25,3	24,3
Температура, °C:					
- начала интенсивного разложения;	213	216	225	218	210
- максимальной скорости разложения;	315	321	325	317	335
- самовоспламенения	490	480	470	460	490

РИСУНОК 5

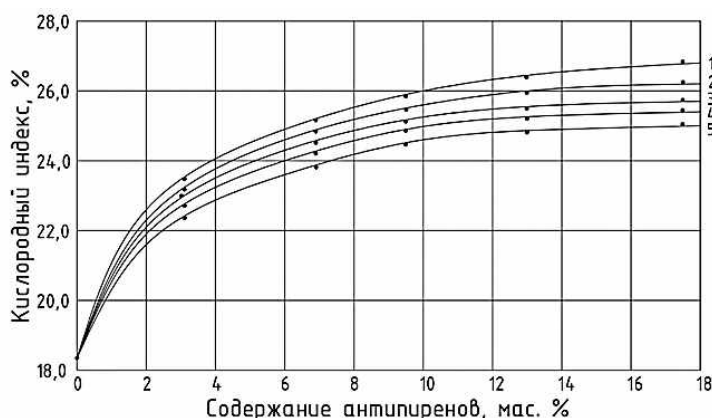
ЗАВИСИМОСТЬ КИСЛОРОДНОГО ИНДЕКСА ЗАЛИВОЧНЫХ ППЭ ОТ СОДЕРЖАНИЯ АДДИТИВНЫХ БРОМОРГАНИЧЕСКИХ АНТИПИРЕНОВ:

- 1 - N (2,4,6, - трибромфенил)малеинимид;
- 2 – тетрабромдифенилолпропан;
- 3 – гексабромбензол;
- 4 – декабромдифенилоксид;
- 5 – тетрабромфталевый ангидрид

Figure 5

Dependence of the oxygen index of the filling PPE on the content of additive organobromine flame retardants:

- 1 - N (2,4,6, - tribromophenyl)maleinimide;
- 2 - tetrabromodiphenylpropane;
- 3 - hexabromobenzene;
- 4 - decabromodiphenyloxide;
- 5 - tetrabromophthalic anhydride.



Для получения умеренногорючих заливочных пенопластов на основе реакционноспособных олигомеров, согласно данным работы [29], КИ должен превышать 26%. Из рисунка 5 следует, что для исследованных ППЭ указанный эффект достигается при содержании аддитивных броморганических антипиренов (N(2,4,6-трибромфенил) малеинида и тетрабромдифенилолпропана) более 12,0 мас.%, т.е. при концентрации брома в полимерной матрице более 7,3 мас.%. Следует отметить, что аддитивные антипирены в процессе длительной эксплуатации теплоизоляционных изделий склонны к миграции из полимерной матрицы, что приводит к повышению горючести пенопластов и снижению их эксплуатационных характеристик. Поэтому предпочтительнее использовать реакционноспособные бром- и фосфорсодержащие антипирены. Влияние содержания реакционноспособных бром- и фосфорсодержащих антипиренов на горючесть заливочных эпоксидных пенопластов представлено на рисунке 6.

РИСУНОК 6

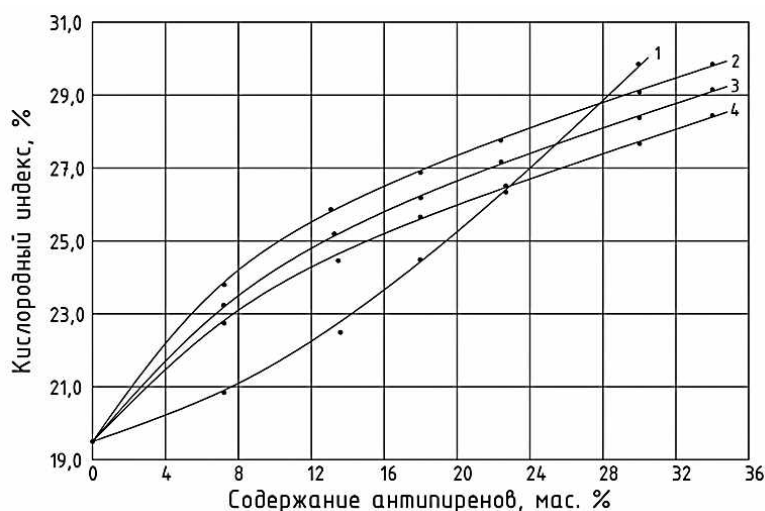
ЗАВИСИМОСТЬ КИСЛОРОДНОГО ИНДЕКСА ЗАЛИВОЧНЫХ ППЭ ОТ СОДЕРЖАНИЯ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫХ АНТИПИРЕНОВ:

- 1 – 2-фосфоноксиэтилметакрилат;
- 2 – эпоксидная смола марки УП-645;
- 3 – эпоксидная смола марки УП-631;
- 4 – эпоксидированные отходы производства тетрабромдифенилолпропана.

Figure 6

Dependence of the oxygen index of casting PPE on the content of reactive flame retardants:

- 1 - 2-phosphonoxyethyl methacrylate;
- 2 - epoxy resin of UP-645 grade;
- 3 - epoxy resin of UP-631 grade;
- 4 - epoxidized wastes of tetrabromodiphenylpropane production.



Перспективным направлением снижения горючести эпоксидных пенопластов строительного назначения является использование в качестве антипиренов эпоксидированных отходов производства тетрабромдифенилолпропана. Кислородный индекс ППЭ при их содержании более 17 мас. % превышает 27%. Следует отметить, что с ростом содержания ЭОТБДП увеличивается плотность ППЭ и, соответственно, происходит увеличение прочности эпоксидных пенопластов. При этом по эксплуатационным характеристикам ППЭ, модифицированный эпоксидированными отходами производства тетрабромдифенилолпропана, уступает другим видам модифицированных пенополиэпоксидов, но имеет значительно меньшую стоимость. Положительный эффект достигается и при применении фосфорсодержащего олигоэфирметакрилата (рисунок 6). Основные эксплуатационные свойства, горючесть и термостойкость заливочных эпоксидных пенопластов пониженной горючести приведены в таблице 3, а зависимость разрушающего напряжения при сжатии от кажущейся плотности разработанных ППЭ строительного назначения представлены на рисунке 7.

To obtain moderately flammable casting foams based on reactive oligomers, according to [29], the KI should exceed 26%. It follows from Figure 5 that for the investigated FPEs the indicated effect is achieved at the content of additive organobromine flame retardants (N(2,4,6-tribromophenyl) maleinimide and tetrabromodiphenylolpropane) more than 12.0 wt.%, i.e. at the concentration of bromine in the polymer matrix more than 7.3 wt.%. It should be noted that additive flame retardants in the process of long-term operation of heat-insulating products are prone to migration from the polymer matrix, which leads to an increase in the flammability of foams and a decrease in their performance characteristics. Therefore, it is preferable to use reactive bromo- and phosphorus-containing flame retardants. The influence of the content of reactive bromine- and phosphorus-containing flame retardants on the flammability of epoxy foam pours is presented in Figure 6.

The use of epoxidized wastes of tetrabromodiphenylolpropane production as flame retardants is a promising direction to reduce flammability of epoxy foams for construction purposes. The oxygen index of PPE with their content of more than 17 wt. % exceeds 27%. It should be noted that with the increase of EWTBDP content the density of PPE increases and, accordingly, the strength of epoxy foams increases. At the same time, in terms of performance characteristics, the PPE modified with epoxidized wastes of tetrabromodiphenylolpropane production is inferior to other types of modified polyepoxide foams, but has a significantly lower cost. A positive effect is also achieved with the use of phosphorus-containing oligoether methacrylate (Figure 6). The main performance properties, flammability and heat resistance of casting epoxy foams of reduced flammability are given in Table 3, and the dependence of compressive failure stress on apparent density of the developed PPE for construction purposes is presented in Figure 7.

РИСУНОК 7

ЗАВИСИМОСТЬ РАЗРУШАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ СЖАТИИ ОТ КАЖУЩЕЙСЯ ПЛОТНОСТИ ЗАЛИВОЧНЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПЕНОПЛАСТОВ:

- 1 – исходный ППЭ;
- 2 – ППЭ на основе фосфорсодержащего олигоэфирметакрилат;
- 3 – ППЭ, содержащий эпоксирированные отходы производства тетрабромдифенилолпропана.

Figure 7

Dependence of breaking stress in compression on apparent density of epoxy foams:

- 1 - initial PPE;
- 2 - PPE based on phosphorus-containing oligoether methacrylate;
- 3 - PPE containing epoxidized wastes of tetrabromodiphenylpropane production.

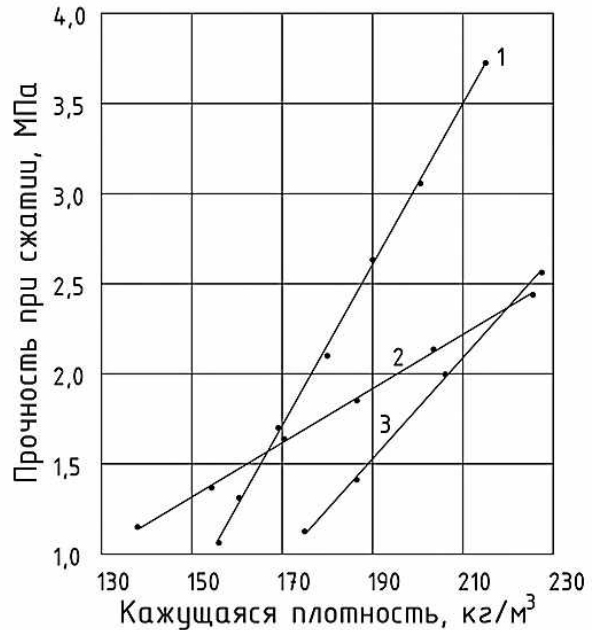


ТАБЛИЦА 3 ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ГОРЮЧЕСТЬ И ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ЗАЛИВОЧНЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПЕНОПЛАСТОВ.

Table 3 Physical and mechanical properties, flammability and heat resistance of poured epoxy foams.

Показатели Indicators	Исходный заливочный эпоксидный пенопласт Initial pouring epoxy foam foam	Вид реакционноспособного антипирена Type of reactive flame retardant	
		Фосфорсодержащий ОЭМ Phosphorus-containing OEM	Отходы производства Тетрабромдифенилолпропана Waste products Tetrabromodiphenylpropane
Кажущаяся плотность, кг/м³	150-220	130-230	170-230
Разрушающее напряжение, Мпа, при:			
- сжатии	1,07-3,70	1,15-2,65	1,12-2,55
- растяжении	0,64-1,40	0,54-1,25	0,48-1,10
Водопоглощение за 24 часа, % объемн.	3,00-3,40	6,70-7,80	6,40-7,50
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,051-0,054	0,051-0,060	0,052-0,058
Кислородный индекс, %	19,5-19,8	27,2-28,5	28,4-29,2
Температура, °С:			
- начала интенсивного разложения;	232-235	239-242	222-225
- максимальной скорости разложения;	342-345	349-353	318-322
- воспламенения;	375	365	360
- самовоспламенения	460	490	480

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований показано влияние химической природы и содержания фосфатных пластификаторов, аддитивных броморганических и микрокапсулированных антипиренов, реакционноспособных бром- и фосфорсодержащих соединений и хлорированного парафина марки Парахлор-380 на термостойкость, горючесть и физико-механические свойства ППЭ. Это позволило авторам

Conclusions

As a result of the conducted experimental studies the influence of chemical nature and content of phosphate plasticizers, additive organobromine and microencapsulated flame retardants, reactive bromo- and phosphorus-containing compounds and chlorinated paraffin of Parachlor-380 grade on heat resistance, flammability and physical and mechanical properties of EPS was shown. This allowed the authors to develop moderately flammable pouring epoxy foams for

разработать умеренногорючие заливочные эпоксидные пенопласты строительного назначения, обладающие высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками.

Литература:

1. Гурьев В.В., Жуков А.Д., Еремеев В.Е., Желудов В.С., Семенов В.С., Боброва Е.Ю. Тепловая изоляция в промышленности. Теория, материалы и системы изоляции. - М.: НИУ МГСУ, 2021. - 184 с.
2. Берлин А.А., Шутов Ф.А. Химия и технология газонаполненных высокополимеров. - М.: Наука, 1980. - 503с.
3. Дементьев А.Г., Тараканов О.Г. Структура и свойства пенопластов. - М.: Химия, 1983. - 176с.
4. Клемпнер Д. Полимерные пены и технологии вспенивания: пер. с англ. Под ред. А.М. Чеботаря – СПб: Профессия, 2009. - 600с.
5. Сахаров В.И. Пеноэпоксидная теплоизоляция сооружений в работах с суровым климатом. – Л.: Стройиздат, Ленингр. Отделение, 1980. – 144с.
6. Федосов С.В., Малбиев С. А., Кусенпова А.А. и др. Состояние и перспективы применения полимерных теплоизоляционных материалов в строительстве // Вестник Поволжского ГТУ. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. - 2018. - №3. - С.26-43.
7. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные газонаполненные полимерные материалы и изделия // International journal of applied and fundamental research. - 2020. - №10. – С. 54 - 67.
8. Чернин И.З., Смахов Ф.М., Жердев Ю.З. Эпоксидные полимеры и композиции. – М.: Химия, 1982. – 232с.
9. Хозин В.Г. Усиление эпоксидных полимеров. – Казань: Изд-во ПИК «Дом печати», 2004. – 446с.
10. Панина Н.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Гребнева Т.А., Гуревич Я.М. Основные способы модификации эпоксидных полимерных материалов в России. //Все материалы. Энциклопедический сборник. – 2014. - №9. – С. 10-17.
11. Ушков В.А., Григорьева Л.С., Абрамов В.В. Горючесть эпоксидных полимеров // Вестник МГСУ. – 2011. - №1. – Том 2. – С. 352-356.
12. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. –СПб: Научные основы и технологии, 2011-416с.
13. Барбатько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения: анализ состояния, методы испытаний, перспективы развития, методические особенности. – М.: ВИАМ, 2018. – 424с.
14. Yusuf M. A review on flame retardant textile finishing: current and future trends // Current Smart. Mater. - 2018. -V. 3. - №. 2. - P. 99-108, <http://dx.doi.org/10.2174/2405465803666180703110858>
15. Jadhav S.D. A review of non-halogenated flame retardant // Farm, Innov, J, - 2018. - V. 7. - №. 5. - P. 380-386.
16. Seidi F., Movahedifar B., Naderi G., Akbari V., Ducos F., Shamsi "habi HL, Saeb MLR. Flame Retardant Polypropylenes: A Review // Polimers. - 2020, -V. 12. -№. 8. -1701. https://doi.org/10.3390/polym1208_1701
17. Islam M. S., van de Ven T. G. M. Cotton-based flame-retardant textiles: A review" // BioResources. - 2021. -V. 16, - №. 2. - P. 4354-4381.
18. Wang X., Li Y., Meng D., Gu X., Sun J., Hu Y., Bourbigot S., Zhang S. A review on Flame-Retardant Polyvinyl Alcohol: Additives and Technologies // Polym. Rey. - 2023. - V. 63. - №. 2. -P. 324-364. <https://doi.org/10.1080/15583724.2022.2076694>.
19. Jadvav A., de Sousa FE P., Dawsey T., Gupta R.R Recent Advancements in Flame-Retardant Polyurethane Foams: A Review // Ind. Eng. Chem, Res, - 2022. - V. 61. - №. 41. - P. 15046-15065. <https://orcid.org/0000-0001-5355-3897>

construction purposes with high technological and operational characteristics.

References:

1. Guriev V.V., Zhukov A.D., Eremeev V.E., Zheludov V.S., Semyonov V.S., Bobrova E.Yu. Thermal insulation in industry. Theory, materials and systems of insulation. - M.: NIU MGSU, 2021. - 184 c.
2. Berlin A.A., Shutov F.A. Chemistry and technology of gas-filled high polymers. - Moscow: Nauka, 1980. - 503c.
3. Dementiev A.G., Tarakanov O.G. Structure and Properties of Foam Plastics. - Moscow: Khimiya, 1983. - 176c.
4. Klemmpner D. Polymer foams and foaming technologies: per. from Engl. Edited by A.M. Chebotar - SPb: Profession, 2009. - 600c.
5. Sakharov V.I. Foam-epoxy thermal insulation of constructions in works with severe climate. - L.: Stroyizdat, Leningr. Branch, 1980. - 144c.
6. Fedosov S.V., Malbiev S.A., Kusenpova A.A. et al. State and prospects of application of polymeric heat-insulating materials in construction // Bulletin of Povolzhskiy KSTU. Series: Materials. Constructions. Technologies. - 2018. - №3. - C.26-43.
7. Kolosova A.S., Pikalov E.S. Modern gas-filled polymer materials and products // International journal of applied and fundamental research. - 2020. - №10. - C. 54 - 67.
8. Chernin, I.Z.; Smekhov, F.M.; Zherdev, Yu.Z. Epoxy polymers and compositions. - Moscow: Khimiya, 1982. - 232c.
9. Khozin V.G. Reinforcement of epoxy polymers. - Kazanov: Izd-vo PIK "House of Press", 2004. - 446c.
10. Panina N.N., Chursova L.V., Babin A.N., Grebneva T.A., Gurevich Y.M. Main methods of modification of epoxy polymer materials in Russia. //All materials. Encyclopedic collection. - 2014. - №9. - C. 10-17.
11. Ushkov V.A., Grigoreva L.S., Abramov V.V. Flammability of epoxy polymers // Vestnik MGSU. - 2011. - №1. - Vol. 2. - C. 352-356.
12. Mikhaylin Yu.A. Heat, thermal and fire resistance of polymeric materials. -SPb: Scientific bases and technologies, 2011 - 416 p.
13. Barbatko S.L., Volny O.S., Kirienko O.A., Shurkova E.N. Estimation of fire safety of polymeric materials for aviation purposes: analysis of the state, test methods, development prospects, methodological features. - M.: VIAM, 2018. - 424c.
14. Yusuf M. A review on flame retardant textile finishing: current and future trends // Current Smart. Mater. - 2018. -V. 3. - №. 2. - P. 99-108, <http://dx.doi.org/10.2174/2405465803666180703110858>
15. Jadhav S.D. A review of non-halogenated flame retardant // Farm, Innov, J, - 2018. - V. 7. - №. 5. - P. 380-386.
16. Seidi F., Movahedifar B., Naderi G., Akbari V., Ducos F., Shamsi "habi HL, Saeb MLR. Flame Retardant Polypropylenes: A Review // Polimers. - 2020, -V. 12. -№. 8. -1701. https://doi.org/10.3390/polym1208_1701
17. Islam M. S., van de Ven T. G. M. Cotton-based flame-retardant textiles: A review" // BioResources. - 2021. -V. 16, - №. 2. - P. 4354-4381.
18. Wang X., Li Y., Meng D., Gu X., Sun J., Hu Y., Bourbigot S., Zhang S. A review on Flame-Retardant Polyvinyl Alcohol: Additives and Technologies // Polym. Rey. - 2023. - V. 63. - №. 2. -P. 324-364. <https://doi.org/10.1080/15583724.2022.2076694>.
19. Jadvav A., de Sousa FE P., Dawsey T., Gupta R.R Recent Advancements in Flame-Retardant Polyurethane Foams: A Review // Ind. Eng. Chem, Res, - 2022. - V. 61. - №. 41. - P. 15046-15065. <https://orcid.org/0000-0001-5355-3897>
20. Mosavi A.I. Flame Retardants, Their Beginning, Types, and Environmental Impact: A Review // Epitoanyag-J. Silicate

20. Mosavi A.I. Flame Retardants, Their Beginning, Types, and Environmental Impact: A Review // Epitoanyag-J. Silicate Compos. Mater, - 2022. - V. 74. - №. 2. -P. 2-8, <http://dx.doi.org/10.143 82/epitoanyag-jsbcm.2022.01>.
21. Рудницкая Ю.Р., Панфилова Д.А., Лавров Н.А. Огнестойкие эпоксидно-новолачные пенопласты // Пластические массы. – 2020 - №11-12. – С. 41-44.
22. Лалаян В.М., Степанов М.В., Ушков В.А., Кондриков Б.Н. Скорость распространения пламени по поверхности пенопластов // Химическая физика. – 1992. – Том 11. - №10. – С. 1378-1382.
23. Ушков В.А., Копытин А.В., Селунев В.А., Смирнов В.А. Эффективность броморганических антипиренов в эпоксидных композиционных материалах // Пожаровзрывобезопасность. – 2017 - Том 26. - №7. – С. 5-15.
24. Барштейн Р.С., Кириллович В.М., Носовский Ю.Е. Пластификаторы для полимеров. – М.: Химия, 1982. – 186с.
25. Ушков В.А., Невздорov Д.И., Булгаков Б.И., Лалаян В.М. Влияние пластификаторов на пожарную опасность полимерных строительных материалов// Строительные материал. – 2014. - №3. – С. 96-101.
26. Ушков В.А., Невздорov Д.И., Лалаян В.М., Ломанин С.М. О влиянии фталатных и фосфатных пластификаторов на воспламеняемость и дымообразующую способность композиционных материалов // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Том 22. - №10. – С. 25-33.
27. Халтуринский Н.А. О механизме действия галогенсодержащих ингибиторов // Все материалы. Энциклопедический сборник. – 2009. - №12. – С. 22-30.
28. Халтуринский Н.А. О механизме действия галогенсодержащих ингибиторов // Все материалы. Энциклопедический сборник. – 2009. - №12. – С. 30-37.
29. Ушков В.А., Гоюнова А.В., Золотарев М.Е., Ушков М.В. Влияние фосфорсодержащих антипиренов на показатели пожарной опасности газонаполненных полимеров на основе реакционноспособных олигомеров// Пожаровзрывобезопасность. – 2023. - Том 32. - №3. – С. 41-53.
- Compos. Mater, - 2022. - V. 74. - №. 2. -P. 2-8, <http://dx.doi.org/10.143 82/epitoanyag-jsbcm.2022.01>.
21. Rudnitskaya Yu.R., Panfilova D.A., Lavrov N.A. Fire-resistant epoxy-novolac foam plastics // Plasticheskie massy. – 2020 - №11-12. - С. 41-44.
22. Lalayan, V.M.; Stepanov, M.V.; Ushkov, V.A.; Kondrikov, B.N. Flame propagation rate on the surface of foam plastics (in Russian) // Chemical Physics. - 1992. - Vol. 11. - №10. - С. 1378-1382.
23. Ushkov V.A., Kopytin A.V., Selunev V.A., Smirnov V.A. Effectiveness of organobromine flame retardants in epoxy composite materials // Pozharovzryvozasnost. – 2017 - Vol. 26. - №7. - С. 5-15.
24. Barshtein R.S., Kirillovich V.M., Nosovsky Y.E. Plasticizers for polymers. - Moscow: Khimiya, 1982. - 186с.
25. Ushkov V.A., Nevzdorov D.I., Bulgakov B.I., Lalayan V.M. Influence of plasticizers on the fire hazard of polymer building materials // Stroitelnye materialy. - 2014. - №3. - С. 96-101.
26. Ushkov V.A., Nevzdorov D.I., Lalayan V.M., Lomanin S.M. On the influence of phthalate and phosphate plasticizers on the flammability and smoke-producing ability of composite materials // Fire and explosion safety. - 2013. - Vol. 22. - №10. - С. 25-33.
27. Khalturinsky N.A. On the mechanism of action of halogen-containing inhibitors // All Materials. Encyclopedic collection. - 2009. - №12. - С. 22-30.
28. Khalturinskiy N.A. About the mechanism of action of halogen-containing inhibitors // All materials. Encyclopedic collection. - 2009. - №12. - С. 30-37.
29. Ushkov V.A., Goyunova A.V., Zolotarev M.E., Ushkov M.V. Influence of phosphorus-containing flame retardants on fire hazard indicators of gas-filled polymers based on reactive oligomers// Pozharovzryvozasnost. - 2023. - Vol. 32. - №3. - С. 41-53.

Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”. Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”

Ушков Максим Валентинович – ведущий инженер, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный университет»

Евтушенко Юрий Михайлович – доктор химических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, E-mail: evt-yuri@mail.ru

Агафонова Наталья Зиновьевна – преподаватель, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный университет», E-mail: natalya-markiv@mail.ru

Ушков Валентин Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный университет», E-mail: va.uschkov@yandex.ru

Самченко Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный университет», E-mail: samchenko@list.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Ushkov Maxim Valentinovich – Leading Engineer of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering,

Yevtushenko Yury Mikhailovich – Doctor of Chemical Sciences, Senior Researcher, FGBUN Institute of Synthetic Polymeric Materials named after N.S. Enikolopov, Russian Academy of Sciences, E-mail: evt-yuri@mail.ru

Agafonova Natalya Zinovievna – lecturer of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: natalya-markiv@mail.ru

Ushkov Valentin Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: va.uschkov@yandex.ru

Svetlana Vasilyevna Samchenko – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: samchenko@list.ru

The authors declare that there is no conflict of interest.