

УДК 666.9.015.427: 666.9.015.45

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 61.59.37

Научная специальность ВАК: 2.6.17 Материаловедение (технические науки)

EDN KUFVDI

DOI 10.62980/2076-0655-2024-128-139

## ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ЗАЛИВОЧНЫХ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТОВ

Золотарев М.Е.<sup>1</sup>, Нагановский Ю.К.<sup>2</sup>, Ушков В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

<sup>2</sup> ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России»

---

### АННОТАЦИЯ

В современной строительной индустрии для повышения термического сопротивления конструкций и снижения тепловых потерь широко используют заливочные пенопласты на основе реакционноспособных олигомеров, обладающие высокими эксплуатационными характеристиками. При этом, особое внимание уделяют применению пенополиизоциануратов (ПИР). Однако, в научно-технической литературе практически отсутствуют данные о влиянии состава пенополиизоциануратов на их термические свойства. Целью настоящей работы является установление влияния соотношения изоцианат/полиол, содержания модификатора (трихлорпропилфосфата) и кажущейся плотности пен на термические свойства заливочных ПИР. Термические свойства ПИР, при их нагревании в интервале температур 30-800 °С в атмосфере азота и на воздухе, исследовали с помощью мультимодального термоаналитического комплекса DuPont-9900 (скорость нагрева 20°С/мин). Выявлено, что термоокислительное разложение пенополиизоциануратов является ярко выраженным, двухстадийным процессом, а деструкция ПИР в инертной среде (азоте) – одностадийным процессом, что свидетельствует о различных механизмах разложения пенопластов на воздухе и азоте. В результате экспериментальных исследований выявлено, что исследованные ПИР более устойчивы к термоокислительной деструкции чем к термической деструкции. Термические свойства указанных пенопластов зависят от соотношения изоцианат/полиол и содержания ТХПФ. Плотность пенополиизоциануратов незначительно влияет на их термостойкость. При оптимальном содержании исходных компонентов ПИР обладают более высокой термостойкостью по сравнению с жесткими пенополиуретанами (ППУ).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пенополиизоцианурат, плотность, потеря массы, термическая и термоокислительная деструкция, скорость разложения.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Золотарев, М. Е. Термостойкость заливочных пенополиизоциануратов / М. Е. Золотарев, Ю. К. Нагановский, В. А. Ушков // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 2. – С. 128-139.

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

QH MATERIALS SCIENCE, COMPOSITES

EDN KUFVDI

DOI 10.62980/2076-0655-2024-128-139

## THERMAL STABILITY OF CASTING POLYISOCYANURATE FOAMS

Zolotarev M.E.<sup>1</sup>, Naganovskii Y.K.<sup>2</sup>, Ushkov V.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

<sup>2</sup> VNIPO of EMERCOM

---

### ABSTRACT

In the modern construction industry for increasing the thermal resistance of structures and reducing heat losses, casting foams based on reactive oligomers with high performance characteristics are widely used. At the same time, special attention is paid to the use of polyisocyanurate foams (PIR). However, in the scientific and technical literature there are practically no data on the influence of the composition of polyisocyanurate foams on their thermal properties. The purpose of this work is to determine the influence of isocyanate/polyol ratio, modifier content (trichloropropyl phosphate) and apparent density of foams on thermal properties of casting PIRs. The thermal properties of PIRs, when heated in the temperature range of 30-800 °C in nitrogen atmosphere and in air, were investigated using a multimodal thermal analytical complex DuPont-9900 (heating rate 20°С/min). It is revealed that thermo-oxidative decomposition of polyisocyanurate foams is a pronounced, two-stage process, and the destruction of PIR in inert medium (nitrogen) is a one-stage process, which indicates different mechanisms of decomposition of foams in air and nitrogen. As a result of experimental studies, it was revealed that the investigated PIRs are more resistant to thermo-oxidative degradation than to thermal degradation. The thermal properties of the above foams depend on the isocyanate/polyol ratio and TCPP content. The density of polyisocyanurate foams insignificantly affects their thermal stability. At the optimal content of initial components PIRs have higher thermal resistance compared to rigid polyurethane foams (FPU).

**KEY WORDS:** polyisocyanurate foam, density, mass loss, thermal and thermo-oxidative degradation, decomposition rate

**FOR CITATION:** Zolotarev, M. E. Thermal stability of casting polyisocyanurate foams / M. E. Zolotarev, Y. K. Naganovskii, V. A. Ushkov // Technique and technology of silicates. – 2024. Vol. – 31, No2. – Pp. 128-139.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время является актуальным повышение термического сопротивления строительных конструкций и снижение тепловых потерь при транспортировке теплоносителя от производителя к потребителю. С учетом изношенности действующих тепловых сетей, превышающих 90%, и введения более жестких нормативов по тепловой защите зданий и сооружений, тепловой изоляции оборудования, регламентированных СП 50.13330.2012 и СП 61.13330.2012, возникла необходимость в применении в строительной индустрии более эффективных теплоизоляционных материалов и конструкций. К высокоэффективным теплоизоляционным материалам относятся газонаполненные полимеры (пенопласты), обладающие низкой плотностью (15-100 кг/м<sup>3</sup>) и теплопроводностью (0,022-0,045 Вт/м\*К), широким температурным диапазоном применения (от -180 до +150 °С), хорошим сочетанием прочности и плотности. Они выдерживают многократные циклы замораживания и оттаивания, значительно повышают надежность и долговечность строительных конструкций, на 10-15% снижают потери тепла и в 1,5-1,8 раза увеличивают производительность труда при выполнении строительно-монтажных работ [1-12]. Учитывая, что прочность пенопластов, в основном, пропорциональна их плотности, требуемый диапазон плотностей газонаполненных полимеров определяется областью их применения.

Среди заливочных пенопластов на основе реакционно-способных олигомеров в строительной индустрии широко используют резольные пенофенопласты и карбамидные пенопласты, пенополиуретаны (ППУ) и пенополиизоцианураты (ПИР). При этом, последние значительно превосходят по своим эксплуатационным характеристикам традиционные теплоизоляционные материалы [13,14]. В качестве примера ниже приведены основные эксплуатационные показатели заливочных ПИР [14]:

кажущаяся плотность, кг/м<sup>3</sup> – 30-40;  
прочность при 10%-ном сжатии, кПа – 120;  
водопоглощение за 24 часа, % объёмн. – 2,0;  
теплопроводность, Вт/(м\*К) – 0,022-0,027;  
температура эксплуатации, °С – от -65 до +110;  
группа горючести – Г1-Г2.

Однако, существенным недостатком пенопластов на основе полиуретанов является их низкая термостойкость.

В научно-технической литературе большое внимание уделяется исследованию закономерностей термической и термоокислительной деструкции различных полиуретанов, жестких и эластичных ППУ: так, например, установлено, что при низкотемпературном пиролизе полиуретанов и жестких ППУ происходит в основном разложение уретановых групп с образованием исходных полиолов, аминов, используемых в качестве катализаторов при синтезе указанных полимеров и 4,4'-метиленидифенилдиизоцианата. Пиролиз полиуретанов сопровождается протеканием вторичных процессов, таких как дегидратация полиолов с образованием различных оксигенатов (спиртов, кетонов, альдегидов, простых и сложных эфиров) декарбоксилирование с выделением CO<sub>2</sub>, а также циклизация и ароматизация углеводородов с образованием полициклических ароматических соединений, содержащих до 4-5 бензольных колец [15-17].

## INTRODUCTION

Nowadays it is urgent to increase the thermal resistance of building structures and reduce heat losses during transportation of heat carrier from the producer to the consumer. Taking into account the deterioration of existing heat networks, which exceed 90%, and the introduction of more stringent standards for thermal protection of buildings and structures, thermal insulation of equipment, regulated by SP 50.13330.2012 and SP 61.13330.2012, there is a need to use more effective thermal insulation materials and structures in the construction industry. Gas-filled polymers (foam plastics) possessing low density (15-100 kg/m<sup>3</sup>) and thermal conductivity (0,022-0,045 W/m\*K), wide temperature range of application (from -180 to +150 °C), good combination of strength and density belong to highly effective heat-insulating materials. They withstand multiple cycles of freezing and thawing, significantly increase the reliability and durability of building structures, reduce heat losses by 10-15% and increase labor productivity during construction and installation works by 1.5-1.8 times [1-12]. Taking into account that the strength of foams is mainly proportional to their density, the required density range of gas-filled polymers is determined by the field of application.

Among the casting foams based on reactive oligamers, resin and urea foams, polyurethane foams (PU) and polyisocyanurate foams (PIR) are widely used in the construction industry. At the same time, the latter are significantly superior in their performance characteristics to traditional thermal insulation materials [13,14]. As an example, the main performance indicators of casting PIRs are given below [14]:

apparent density, kg/m<sup>3</sup> - 30-40;  
strength at 10% compression, kPa - 120;  
water absorption for 24 hours, % vol. - 2,0;  
thermal conductivity, W/(m\*K) - 0,022-0,027;  
operating temperature, °C - from -65 to +110;  
flammability group - G1-G2.

However, a significant disadvantage of polyurethane-based foams is their low heat resistance.

In the scientific and technical literature much attention is paid to the study of regularities of thermal and thermo-oxidative degradation of various polyurethanes, rigid and elastic FPU: for example, it is established that at low-temperature pyrolysis of polyurethanes and rigid FPU there is mainly decomposition of urethane groups with the formation of initial polyols, amines used as catalysts in the synthesis of these polymers and 4,4'-methylenediphenyl diisocyanate. Pyrolysis of polyurethanes is accompanied by secondary processes such as dehydration of polyols with formation of various oxygenates (alcohols, ketones, aldehydes, simple and esters) decarboxylation with release of CO<sub>2</sub>, as well as cyclization and aromatization of hydrocarbons with formation of polycyclic aromatic compounds containing up to 4-5 benzene rings [15-17].

The composition of pyrolysis products of polyurethanes depends not only on the conditions of thermal

При этом состав продуктов пиролиза полиуретанов зависит не только от условий термического разложения полимеров (температуры, скорости нагрева, атмосферы, и т.д.) и применения различных пиролизических устройств, но и от химического строения и содержания полиолов и изоцианатов, катализаторов и пластификаторов, а также других целевых добавок, используемых при синтезе полиуретанов [15-17]. Большое влияние на термостойкость полиуретанов и ППУ оказывает изоцианатный индекс (соотношение групп NCO-групп изоцианатов, и OH-групп полиолов) при получении полиуретанов и материалов на их основе.

Выявлено, что термоокислительное разложение полиуретанов и ППУ протекает с большей скоростью чем их пиролиз в инертной среде, с образованием меньшего количества различных углеводородов и большей концентрации выделяющегося CO<sub>2</sub>. Ускорение разложения полиуретанов на воздухе происходит за счет разрушения полиольных структур и снижения температуры разложения полиуретанов на полиолы и диизоцианаты и их изомеры до 200 °C по сравнению с пиролизом полимеров в инертной среде [16,17].

Повышение термостойкости полиуретанов достигается, чаще всего, химической модификацией за счет введения в их состав термостойких структур, например, изоциануратов, образующихся в процессе каталитической тримеризации изоцианатов [16,17]. Представителями газонаполненных полимеров, содержащих и изоциануратные структуры являются ПИР. Разложение ПИР на воздухе протекает в две стадии. На первой стадии при температуре до 300 °C происходит разрыв полиольных и изоцианатных связей, а потеря массы достигает 50%. Вторая стадия протекает вплоть до 800 °C с образованием небольшого коксового остатка [17]. Особенности термической и термоокислительной деструкции полиуретанов и ППУ детально рассмотрены в работах [16,17].

Поведение различных марок ПИР при тепловом и огневом воздействии рассмотрено в работе [18]. Авторами работы установлено, что модифицированные фосфорорганическими антипиренами ПИР марок «Арианит», плотностью 47-50 кг/м<sup>3</sup>, производства компании ЗАО «Ариада» относятся к группе горючести Г1, при испытании по методу II ГОСТа 30244-94 и к группе воспламеняемости В1 при испытании по ГОСТ 30402-96, а теплота их сгорания составляет 25,86 МДж/кг. ПИР плотностью 40-45 кг/м<sup>3</sup> относится к группе горючести Г2 и группе воспламеняемости В2, а коксовый остаток при температуре 850 °C не превышает 27%.

Таким образом, анализ научно-технической литературы показал, что одними из самых эффективных полимерных теплоизоляционных материалов являются пенополиуретаны и пенополиизоцианураты, обладающие высокими эксплуатационными характеристиками. При этом, основное внимание уделялось исследованию физико-механических характеристик пенополиизоциануратов. В то же время в литературе отсутствует достоверные данные о влиянии соотношения изоцианат/полиол и содержания ТХПФ, а также кажущейся плотности ПИР на термические свойства указанных пенопластов. Поэтому **целью данного исследования** являлось установить влияние соотношения изоцианатов и полиолов, содержание ТХПФ и плотности пен на основные термические свойства, заливочных пенополиизоциануратов.

decomposition of polymers (temperature, heating rate, atmosphere, etc.) and the use of various pyrolytic devices, but also on the chemical structure and content of polyols and isocyanates, catalysts and plasticizers, as well as other target additives used in the synthesis of polyurethanes [15-17]. The isocyanate index (the ratio of NCO-groups of isocyanates and OH-groups of polyols) has a great influence on the thermal stability of polyurethanes and polyurethane-based materials.

It was revealed that thermo-oxidative decomposition of polyurethanes and PPU proceeds at a higher rate than their pyrolysis in inert medium, with the formation of a smaller amount of various hydrocarbons and a higher concentration of released CO<sub>2</sub>. Acceleration of polyurethanes decomposition in air occurs due to destruction of polyol structures and decrease of polyurethanes decomposition temperature into polyols and diisocyanates and their isomers up to 200 °C in comparison with polymer pyrolysis in inert medium [16,17].

Increasing the thermal stability of polyurethanes is most often achieved by chemical modification through the introduction of heat-resistant structures, for example, isocyanurates formed in the process of catalytic trimerization of isocyanates [16,17]. The representatives of gas-filled polymers containing isocyanurate structures are PIRs. The decomposition of PIRs in air proceeds in two stages. At the first stage at temperatures up to 300 °C, polyol and isocyanate bonds are broken, and mass loss reaches 50%. The second stage proceeds up to 800 °C with the formation of a small coke residue [17]. The features of thermal and thermo-oxidative degradation of polyurethanes and PPU are discussed in detail in [16,17].

The behavior of different brands of PIR under thermal and fire exposure is considered in [18]. The authors of the work found that modified organophosphorus flame retardants PIR grades "Arianit", density 47-50 kg/m<sup>3</sup>, produced by CJSC "Ariada" belong to flammability group G1 when tested according to method II of GOST 30244-94 and to flammability group B1 when tested according to GOST 30402-96, and their heat of combustion is 25.86 MJ/kg. PIR with density 40-45 kg/m<sup>3</sup> belongs to flammability group G2 and flammability group B2, and coke residue at temperature 850 °C does not exceed 27%.

Thus, the analysis of scientific and technical literature has shown that one of the most effective polymeric thermal insulation materials are polyurethane foams and polyisocyanurate foams with high performance characteristics. At the same time, the main attention was paid to the study of physical and mechanical characteristics of polyisocyanurate foams. At the same time, there is no reliable data in the literature on the influence of isocyanate/polyol ratio and TCPF content, as well as apparent density of PIR on the thermal properties of these foams. Therefore, the **purpose of this study** was to determine the influence of isocyanate/polyol ratio, TCPF content and foam density on the basic thermal properties of the poured polyisocyanurate foams.

**Материалы и методы исследования**

Заливочные пенополиизоцианураты получали на основе полиолов (ТУ 2422-058-38892610-2014) и 4,4-дифенилметилendiоцианата (ТУ 2472-002-72311668-2004), содержащего 30% NCO-групп. В качестве катализатора тримеризации диизоцианатов применяли октоат калия (Trimer K-15), производства компании NANJING MAYSTA FINE CHEMICAL CO., LTD. В качестве катализатора вспенивания и отверждения ПИР использовали катализатор марки Polycat 5, производства компании Air Products Chemicals Europe B.V., а в качестве вспенивающего агента – воду (ГОСТ 23732-2011) и смесь n-пентана и изопентана, взятых в соотношении 80:20 (ТУ 0272-68-00151638-2006). Для улучшения технологических свойств ПИР использовали трихлорпропилфосфат (ТУ 2493-513-05763441-2007), который является одновременно и антипиреном для пенопластов. В качестве поверхностно-активного вещества применяли кремнийорганическое соединение Silicone L-5111, производства компании Momentive Performance Materials Inc.

Кажущуюся плотность исследуемых пенопластов определяли по ГОСТ 409-2017. Термические свойства пенополиизоциануратов исследовали с помощью мультимодульного термоаналитического комплекса DuPont – 9900 при нагревании образцов ПИР массой 5-8 мг. со скоростью 20 °С/мин на воздухе и в токе азота, с учетом требований ГОСТ Р 53293-2009. В качестве критериев термостойкости ПИР использовали температуры начала интенсивного разложения ( $T_{np}$ ), 5%-ной потери массы ( $T_{5\%}$ ) и максимальной скорости разложения ( $T_{max}$ ). Образцы ПИР после нагрева в инертной среде до 750 °С, продолжали нагревать в атмосфере воздуха до 800 °С.

**Результаты исследования и их обсуждение**

Эксплуатационные и термические свойства заливочных ПИР зависят от функциональности и молекулярной массы используемых полиолов, соотношения изоцианатов и полиолов, кажущейся плотности и содержания целевых добавок.

На рис. 1 представлены ТГ- и ДТГ-кривые разложения ПИР плотностью 27,1 и 33,6 кг/м<sup>3</sup> в атмосфере азота и на воздухе. Из рис. 1 следует, что механизм пиролиза пенополиизоциануратов на воздухе и в инертной среде различен. Термоокислительное разложение исследованных ПИР является ярко выраженным двухстадийным процессом: на первой стадии термоокислительной деструкции ПИР при температурах 250-380 °С, максимальная скорость разложения пенопластов в 2,28-2,50 ниже максимальной скорости разложения на второй стадии при температурах 450-620 °С. При этом потеря массы на первой и второй стадиях термоокислительного разложения ПИР равны соответственно: 39,7-41,8 и 56,6-59,8 %, а  $T_{max}$  - 328-329 и 546-553 °С.

Термическая деструкция ПИР в инертной среде является одностадийным процессом: максимальная скорость разложения составляет 12,1-12,96 %/мин, а  $T_{max}$  = 331-338 °С. При этом исследованные ПИР более стойки в окислительной среде по сравнению с инертной средой. Так, например,  $T_{5\%}$ ,  $T_{max}$  и потеря массы при температуре 30-450 °С пенополиизоциануратов плотностью 27,1 и 33,6 кг/м<sup>3</sup> при термической и термоокислительной деструкции

**Materials and methods of research**

Polyisocyanurate foams were prepared on the basis of polyols (TU 2422-058-38892610-2014) and 4,4-diphenylmethylenediisocyanate (TU 2472-002-72311668-2004) containing 30% NCO-groups. Potassium octoate (Trimer K-15) produced by NANJING MAYSTA FINE CHEMICAL CO., LTD. was used as a catalyzer for trimerization of diisocyanates. Polycat 5 catalyst produced by Air Products Chemicals Europe B.V. was used as a foaming and curing catalyst, and water (GOST 23732-2011) and a mixture of n-pentane and isopentane taken in the ratio of 80:20 (TU 0272-68-00151638-2006) were used as a foaming agent. To improve technological properties of PIR, trichloropropyl phosphate (TU 2493-513-05763441-2007) was used, which is at the same time an anti-flame retardant for foams. Organosilicon compound Silicone L-5111, produced by Momentive Performance Materials Inc. was used as a surfactant.

The apparent density of the studied foams was determined according to GOST 409-2017. Thermal properties of polyisocyanurate foams were investigated with the help of DuPont-9900 multimodular thermoanalytical complex when heating PIR samples weighing 5-8 mg at a rate of 20 °С/min in air and in a nitrogen current, taking into account the requirements of GOST R 53293-2009. The temperatures of the beginning of intensive decomposition ( $T_{nr}$ ), 5% mass loss ( $T_{5\%}$ ) and maximum decomposition rate ( $T_{max}$ ) were used as criteria of PIR thermal stability. After heating in inert medium up to 750 °С, the PIR samples were heated in air atmosphere up to 800 °С.

**Research results and their discussion**

The performance and thermal properties of casting PIRs depend on the functionality and molecular weight of the polyols used, the ratio of isocyanates to polyols, apparent density and the content of target additives.

Fig. 1 shows TG and DTG decomposition curves of PIR with densities of 27.1 and 33.6 kg/m<sup>3</sup> in nitrogen atmosphere and in air. Fig. 1 shows that the mechanism of pyrolysis of polyisocyanurate foams in air and in inert medium is different. Thermo-oxidative decomposition of the studied PIRs is a pronounced two-stage process: at the first stage of thermo-oxidative degradation of PIRs at temperatures 250-380 °С, the maximum decomposition rate of foams is 2.28-2.50 lower than the maximum decomposition rate at the second stage at temperatures 450-620 °С. Thus mass loss at the first and second stages of thermo-oxidative decomposition of PIR are equal respectively: 39.7-41.8 and 56.6-59.8 %, and  $T_{max}$  - 328-329 and 546-553 °С.

Thermal degradation of PIRs in inert medium is a one-step process: the maximum degradation rate is 12.1-12.96 %/min, and  $T_{max}$  = 331-338 °С. At the same time, the investigated PIRs are more resistant in oxidizing medium compared to inert medium. For example,  $T_{5\%}$ ,  $T_{max}$  and mass loss at 30-450 °С of polyisocyanurate foams with densities of 27.1 and 33, 6 kg/m<sup>3</sup> during thermal and thermo-oxidative degradation are 217-243 and 226-245 °С, 331-338 and 329-328 °С, 50.2-50.6 and 39.7-41.8 %, respectively, and the maximum decomposition rate is 12.1-12.96 and 7.86-8.13 %/min.

РИСУНОК 1

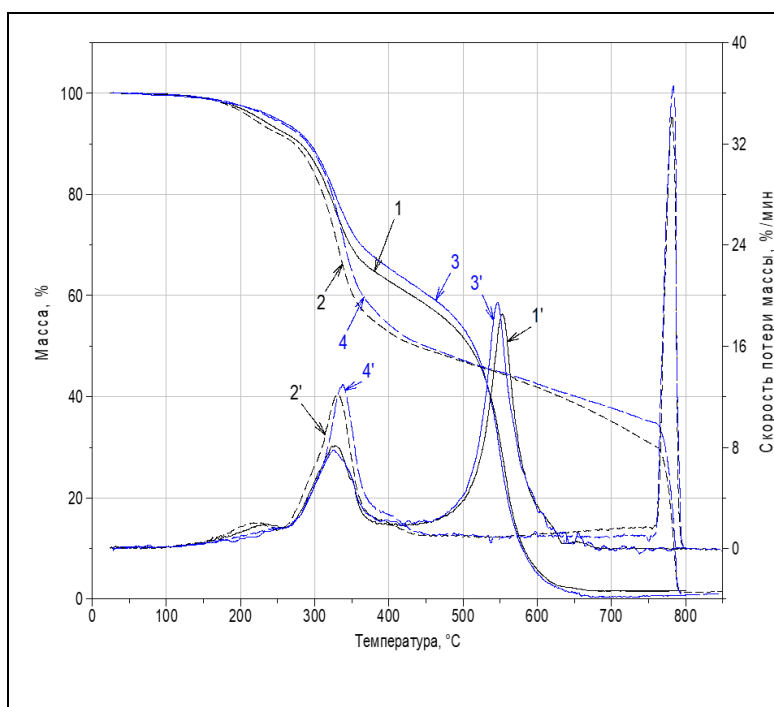
ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ (1,2,3,4) И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ (1',2',3',4') РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТОВ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ

- (1,3,1',3') на воздухе;
- (2,4,2',4') в токе азота
- ПИР плотностью 27,1 кг/м<sup>3</sup> (3,4,3',4');
- ПИР плотностью 33,6 кг/м<sup>3</sup> (1,2,1',2')

Figure 1

Thermogravimetric (1,2,3,4) and Differential Thermogravimetric curves (1',2',3',4') of decomposition of polyisocyanurate foams of different densities

- (1,3,1',1',3') in air;
- (2,4,2',2',4') in a nitrogen current
- PIR with a density of 27.1 kg/m<sup>3</sup> (3,4,3',3',4');
- PIR with a density of 33.6 kg/m<sup>3</sup> (1,2,1',2',2')



равны соответственно 217-243 и 226-245 °С, 331-338 и 329-328 °С, 50,2-50,6 и 39,7-41,8 %, а максимальная скорость разложения составляет 12,1-12,96 и 7,86-8,13 %/мин.

Влияние соотношения изоцианат/полиол на термические свойства заливочных пенополиизоциануратов приведены в таблице 1, а ТГ - и ДТГ - кривые исследованных ПИР при нагревании в атмосфере азота и на воздухе на рисунке 2 и 3.

Анализ данных таблицы 1 показал, что при уменьшении соотношения изоцианат/полиол с 5,01 до 1,25, кажущаяся плотность пенопластов практически не изменяется и составляет 36,5-32,3 кг/м<sup>3</sup>, а термостойкость ПИР существенно снижается.

Influence of isocyanate/polyol ratio on thermal properties of polyisocyanurate foams is given in Table 1, and TG - and DTG - curves of investigated PIRs at heating in nitrogen atmosphere and in air are shown in Figures 2 and 3.

The analysis of the data in Table 1 showed that when the isocyanate/polyol ratio decreases from 5.01 to 1.25, the apparent density of foams practically does not change and amounts to 36.5-32.3 kg/m<sup>3</sup>, and the thermal stability of PIR significantly decreases.

ТАБЛИЦА 1 ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ЗАЛИВОЧНЫХ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТОВ

Table 1 Heat resistance of poured polyisocyanurate foams

Показатели Indications	Соотношение изоцианат/полиол* Isocyanate/polyol ratio		
	5,01	2,35	1,25
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	36,5	33,6	32,3
Температура, °С:			
- начала интенсивного разложения	227	177	138
- 5%-ной потери массы	237	167	133
- 5%-ной потери массы	262	226	201
максимальной скорости разложения, на:	261	217	180
- первой стадии	330	329	320
- второй стадии	351	331	321
- второй стадии	531	553	547
Максимальная скорость разложения, %/мин, на:			
- первой стадии	5,7	8,13	13,4
- второй стадии	7,38	12,1	10,2
- второй стадии	27,6	18,5	21,0
Потеря массы, %, в интервале температур:			
- 30-450 °С	32,9	41,8	50,3
- 30-450 °С	45,5	50,6	54,7
- 450-800 °С	66,5	56,6	48,8
- 450-750 °С	15,3	18,4	17,0
Коксовый остаток, %	0,6	1,6	0,9
Коксовый остаток, %	39,2	31,0	28,3
Скорость окисления кокса, %/мин	38,7	34,2	37,4

\* в числителе данные при нагреве ПИР на воздухе, в знаменателе – в атмосфере азота до 750 °С и до 800 °С на воздухе.

РИСУНОК 2

ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ (1,2,3) И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ (1',2',3') РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТОВ НА ВОЗДУХЕ

- 1,1' при соотношении изоцианат/полиол – 2,35;
- 2,2' при соотношении изоцианат/полиол – 1,25;
- 3,3' при соотношении изоцианат/полиол – 5,01.

Figure 2

Thermogravimetric (1,2,3) and Differential Thermogravimetric curves (1',2',3') of polyisocyanurate foam decomposition in air

- 1,1' at an isocyanate/polyol ratio of 2.35;
- 2,2' at an isocyanate/polyol ratio of 1.25;
- 3,3' at an isocyanate/polyol ratio of -5.01.

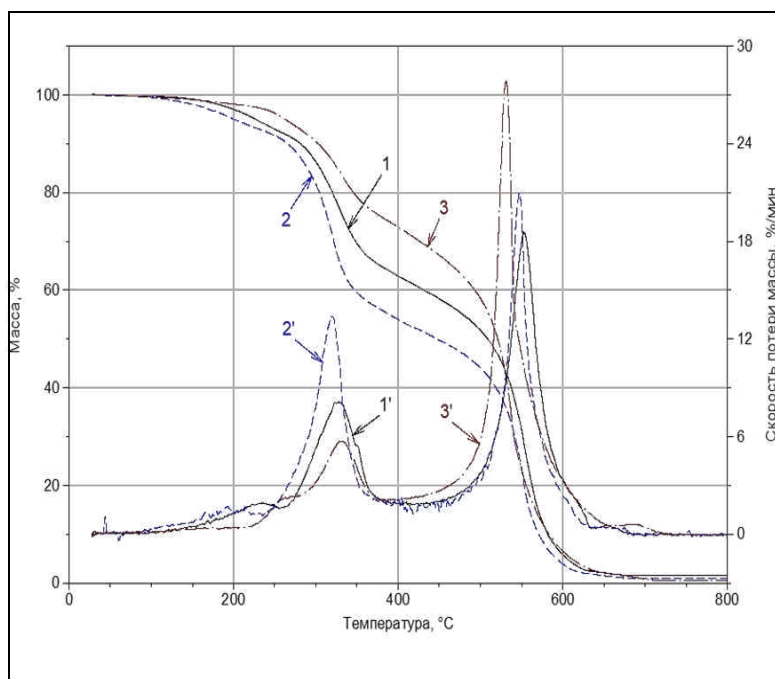


РИСУНОК 3

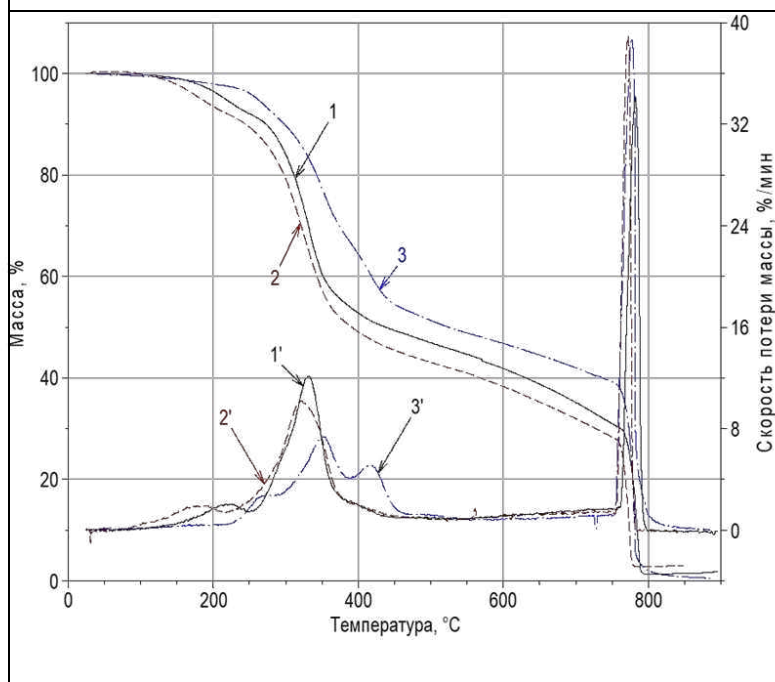
ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ (1,2,3) И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ (1',2',3') РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТОВ В АТМОСФЕРЕ АЗОТ-ВОЗДУХ

- 1,1' при соотношении изоцианат/полиол – 2,35;
- 2,2' при соотношении изоцианат/полиол – 1,25;
- 3,3' при соотношении изоцианат/полиол – 5,01.

Figure 3

Thermogravimetric (1,2,3) and Differential Thermogravimetric curves (1',2',3') of polyisocyanurate foam decomposition in nitrogen-air atmosphere

- 1,1' at an isocyanate/polyol ratio of 2.35;
- 2,2' at an isocyanate/polyol ratio of 1.25;
- 3,3' at an isocyanate/polyol ratio of -5.01.



Так, например, при термоокислительной деструкции температуры  $T_{nr}$ ,  $T_{5\%}$  и  $T_{max}$  уменьшаются соответственно с 227, 262 и 330 °C до 138, 201 и 320 °C, а максимальная скорость разложения на первой стадии и потеря массы в интервале температур 30-450 °C возрастают соответственно с 5,7 до 13,4 %/мин и 32,9 до 50,3 %. Аналогичные закономерности наблюдаются и при термической деструкции в потоке азота (таблица 1). При этом при термической деструкции ПИР (в потоке азота) коксовый остаток снижается с 39,2 до 28,3 %, что свидетельствует об уменьшении термостойкости пенопластов. Наблюдаемый эффект обусловлен, по нашему мнению, ростом степени тримеризации изоцианатов при увеличении содержания изоцианатов в исходной композиции. Оптимальным соотношением изоцианат/полиол в исследованных ПИР является 2,35-2,41.

Существенное влияние на термическую и термоокислительную стабильность исследованных пенополи-

For example, at thermo-oxidative degradation temperatures  $T_{nr}$ ,  $T_{5\%}$  and  $T_{max}$  decrease from 227, 262 and 330 °C to 138, 201 and 320 °C, respectively, and the maximum decomposition rate at the first stage and mass loss in the temperature range of 30-450 °C increase from 5.7 to 13.4%/min and 32.9 to 50.3%, respectively. Similar regularities are observed at thermal degradation in nitrogen flow (Table 1). At the thermal degradation of PIR (in nitrogen flow), the coke residue decreases from 39.2 to 28.3 %, which indicates a decrease in the thermal resistance of foams. The observed effect is caused, in our opinion, by the increase in the degree of trimerization of isocyanates with increasing isocyanate content in the initial composition. The optimal ratio of isocyanate/polyol in the studied PIRs is 2.35-2.41.

Significant influence on thermal and thermo-oxidative stability of the studied polyisocyanurate foams has

изоциануратов оказывает содержание ТХПФ, используемого для улучшения технологических свойств пенопластов и снижения горючести теплоизоляционных изделий на их основе. Установлено, что с ростом содержания ТХПФ в исходной композиции, закономерно снижается термостойкость ПИР (табл. 2, рис. 4,5).

the content of TCPF, used to improve the technological properties of foams and reduce the flammability of thermal insulation products based on them. It was found that with the increase of TCPF content in the initial composition, the thermal stability of PIR decreases (Table 2, Fig. 4,5).

**ТАБЛИЦА 2 ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ЗАЛИВОЧНЫХ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ТРИХЛОРОПРОПИЛФОСФАТОМ**

**Table 2 Thermal stability of casting polyisocyanurate foams modified with trichloropropyl phosphate**

Показатели Indications	Соотношение изоцианат/полиол* Isocyanate/polyol ratio		
	0	2,69	5,14
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	29,1	27,1	26,1
Температура, °С:			
- начала интенсивного разложения	277	277	185
- 5%-ной потери массы	277	185	188
максимальной скорости разложения, на:			
- первой стадии	260	245	222
- второй стадии	256	243	228
Максимальная скорость разложения, %/мин, на:			
- первой стадии	320	328	332
- второй стадии	321	338	344
Потеря массы, %, в интервале температур:			
- 30-450 °С	543	546	546
- 450-800 °С	10,2	7,86	8,43
- 450-750 °С	10,2	12,96	13,9
Коксовый остаток, %	23,3	19,7	19,6
Скорость окисления кокса, %/мин	40,7	39,7	42,2
	47,5	50,2	52,2
	56,5	59,8	55,8
	15,6	14,8	15,8
	0,6	1,6	0,9
	39,2	31,0	28,3
	38,7	34,2	37,4

\* – в числителе представлены данные при нагреве ПИР на воздухе, в знаменателе – в атмосфере азота до 750 °С и до 800 °С на воздухе.

Так, при термоокислительной и термической деструкции исследованных пенопластов, повышение содержания ТХПФ до 5,14% приводит к снижению  $T_{nr}$  и  $T_{5\%}$  на воздухе и в токе азота соответственно с 277 и 260, 277 и 256 °С до 185 и 222, 188 и 228 °С.  $T_{max}$  на первой стадии пиролиза ПИР возрастает с 320 и 321 °С до 332 и 344 °С (табл. 2), а  $T_{max}$  на второй стадии термоокислительного разложения пенопластов, практически не зависит от концентрации ТХПФ и составляет 543-546 °С (табл. 2). При этом, при термической деструкции, максимальная скорость разложения на первой стадии возрастает на 36,3% (с 10,2 до 13,9 %/мин), а при термоокислительной деструкции уменьшается на 17,4% (с 10,2 до 7,86-8,43 %/мин).

Следует отметить, что с повышением содержания ТХПФ в исходной композиции, потеря массы ПИР на первой стадии пиролиза пенополиизоциануратов при 30-450 °С возрастает при нагревании на воздухе с 40,7 до 42,2%, а в токе азота с 47,5 до 52,2%. Это обусловлено, по нашему мнению, испарением ТХПФ из пенопласта. В то же время скорость окисления кокса существенно снижается (с 40 до 31,3 %/мин), что свидетельствует о наличии в коксовом остатке ПИР, соединений фосфора (продуктов разложения ТХПФ), являющихся ингибитором окисления конденсированной фазы (кокса). Оптимальной концентрацией ТХПФ в исходной композиции является 2,69 мас. %.

Thus, during thermo-oxidative and thermal degradation of the studied foams, increasing the content of TCPF up to 5.14% leads to a decrease in  $T_{nr}$  and  $T_{5\%}$  in air and nitrogen current, respectively, from 277 and 260, 277 and 256 °C to 185 and 222, 188 and 228 °C.  $T_{max}$  at the first stage of PIR pyrolysis increases from 320 and 321 °C to 332 and 344 °C (Table 2), and  $T_{max}$  at the second stage of thermal oxidative decomposition of foams, practically does not depend on the concentration of TCPF and is 543-546 °C (Table 2). At the same time, at thermal degradation, the maximum decomposition rate at the first stage increases by 36.3% (from 10.2 to 13.9 %/min), and at thermo-oxidative degradation decreases by 17.4% (from 10.2 to 7.86-8.43 %/min).

It should be noted that with the increase of TCPF content in the initial composition, the mass loss of PIR at the first stage of pyrolysis of polyisocyanurate foams at 30-450 °C increases when heated in air from 40.7 to 42.2%, and in the nitrogen current from 47.5 to 52.2%. This is due, in our opinion, to the evaporation of TCPF from the foam. At the same time, the rate of coke oxidation significantly decreases (from 40 to 31.3 %/min), which indicates the presence in the coke residue of PIR, phosphorus compounds (decomposition products of TCPF), which are an inhibitor of oxidation of the condensed phase (coke). The optimal concentration of TCPF in the initial composition is 2.69 wt. %.

РИСУНОК 4

ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ (1,2,3) И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ (1',2',3') РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТОВ НА ВОЗДУХЕ

- 1,1' содержащих – 2,69 ТХПФ;
- 2,2' без содержания ТХПФ;
- 3,3 содержащих –5,14 ТХПФ.

Figure 4

Thermogravimetric (1,2,3) and Differential Thermogravimetric curves (1',2',3') of polyisocyanurate foam decomposition in air

- 1,1' containing - 2,69 TCPF;
- 2,2' containing no TCPF;
- 3,3' containing -5.14 TCPF.

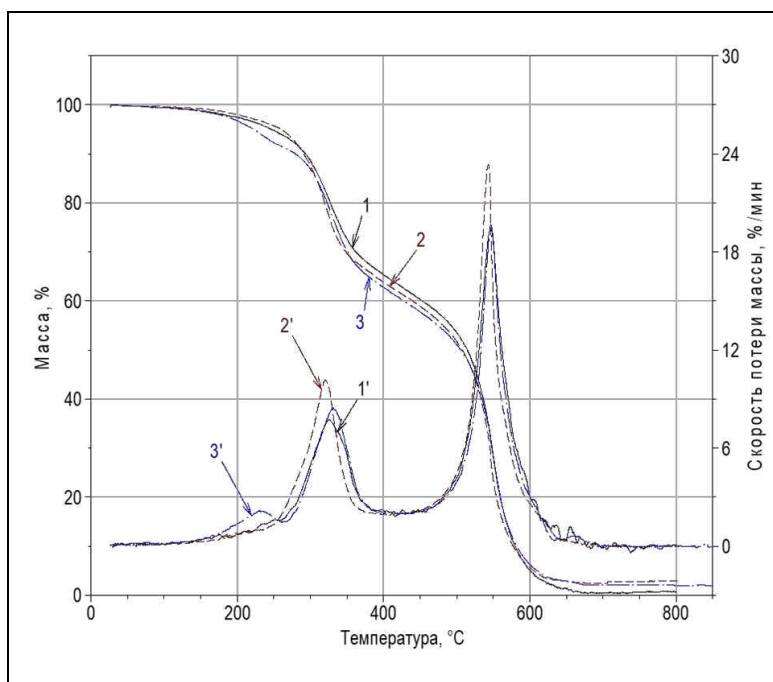


РИСУНОК 5

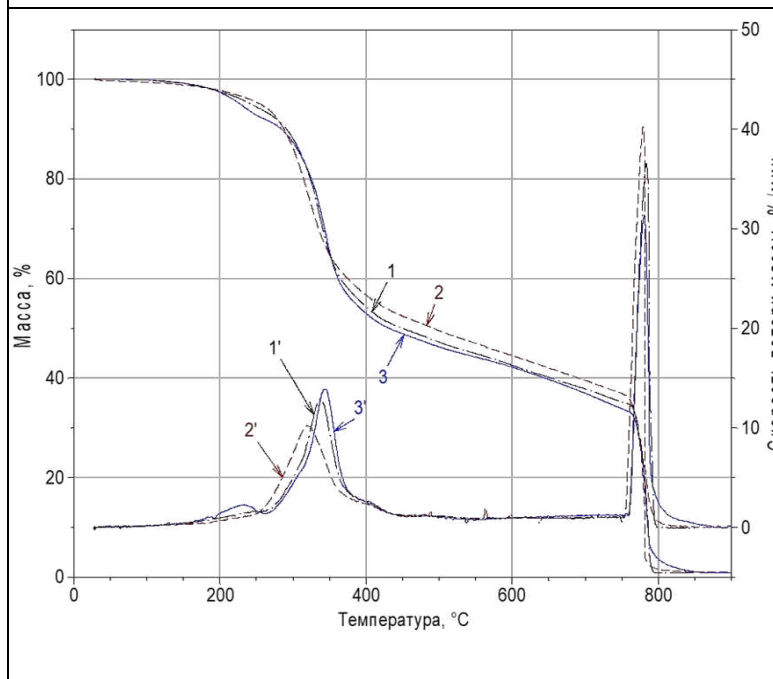
ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ (1,2,3) И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ (1',2',3') РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТОВ В АТМОСФЕРЕ АЗОТ-ВОЗДУХ

- 1,1' содержащих – 2,69 ТХПФ;
- 2,2' без содержания ТХПФ;
- 3,3 содержащих –5,14 ТХПФ.

Figure 5

Thermogravimetric (1,2,3) and Differential Thermogravimetric curves (1',2',3') of polyisocyanurate foam decomposition in nitrogen-air atmosphere

- 1,1' containing - 2,69 TCPF;
- 2,2' containing no TCPF;
- 3,3' containing -5.14 TCPF.



Влияние кажущейся плотности исследованных пенополиизоциануратов на их термические свойства, приведены в табл. 3 и на рис. 6,7. Также, на рисунке 8 представлена зависимость плотности ПИР от содержания вспенивающего агента. Из рис. 8 следует, что для производства пенопластов плотностью 33-38 кг/м<sup>3</sup>, содержание смеси н-пентана и изопентана, взятых в соотношении 80/20, должна составлять 4,3-5,4 мас. %.

Анализ данных таблицы 3 показывает, что плотность пенополиизоциануратов практически не влияет на термостойкость исследованных пенопластов: при нагревании до температуры 450 °C  $T_{nr}$ ,  $T_{5\%}$  и  $T_{max}$  в токе азота и на воздухе равны соответственно 167-187 и 177-183, 217-246 и 226-245 °C, 333-344 и 325-329 °C. Разброс значений показателей термостойкости пенополиизоциануратов различной плотности обусловлен, по нашему мнению, различным содержанием, уретановых

The influence of apparent density of the studied polyisocyanurate foams on their thermal properties, are shown in Table 3 and Figs. 6,7. Also, Figure 8 shows the dependence of PIR density on the content of foaming agent. It follows from Fig. 8 that for the production of foams with density of 33-38 kg/m<sup>3</sup>, the content of the mixture of n-pentane and isopentane taken in the ratio of 80/20 should be 4.3-5.4 wt. %.

The analysis of the data in Table 3 shows that the density of polyisocyanurate foams practically does not affect the thermal stability of the studied foams: when heated to a temperature of 450 °C  $T_{nr}$ ,  $T_{5\%}$  and  $T_{max}$  in a nitrogen current and in air are equal to 167-187 and 177-183, 217-246 and 226-245 °C, 333-344 and 325-329 °C, respectively. The variation of values of thermal resistance indicators of polyisocyanurate foams of different densities is due, in our opinion, to the different content of urethane and isocyanurate groups in the polymer matrix of foams.



РИСУНОК 6

ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТОВ НА ВОЗДУХЕ различной плотности: 2 – 66 кг/м<sup>3</sup>, 3 – 25,1 кг/м<sup>3</sup>, 5 – 43,1 кг/м<sup>3</sup>, 6 – 37,5 кг/м<sup>3</sup>

Figure 6

Thermogravimetric (1,2,3) and Differential Thermogravimetric curves (1',2',3') of polyisocyanurate foam decomposition in air of different densities: 2 - 66 kg/m<sup>3</sup>, 3 - 25.1 kg/m<sup>3</sup>, 5 - 43.1 kg/m<sup>3</sup>, 6 - 37.5 kg/m<sup>3</sup>

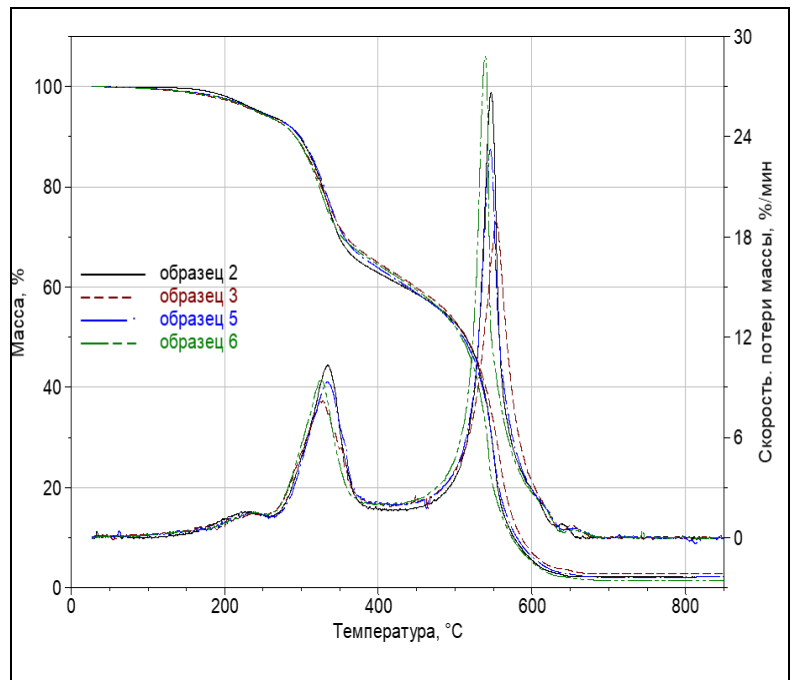


РИСУНОК 7

ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТОВ В АТМОСФЕРЕ АЗОТ-ВОЗДУХ различной плотности: 2 – 66 кг/м<sup>3</sup>, 3 – 25,1 кг/м<sup>3</sup>, 5 – 43,1 кг/м<sup>3</sup>, 6 – 37,5 кг/м<sup>3</sup>

Figure 7

Thermogravimetric (1,2,3) and Differential Thermogravimetric curves (1',2',3') of polyisocyanurate foam decomposition in nitrogen-air atmosphere of different densities: 2 - 66 kg/m<sup>3</sup>, 3 - 25.1 kg/m<sup>3</sup>, 5 - 43.1 kg/m<sup>3</sup>, 6 - 37.5 kg/m<sup>3</sup>

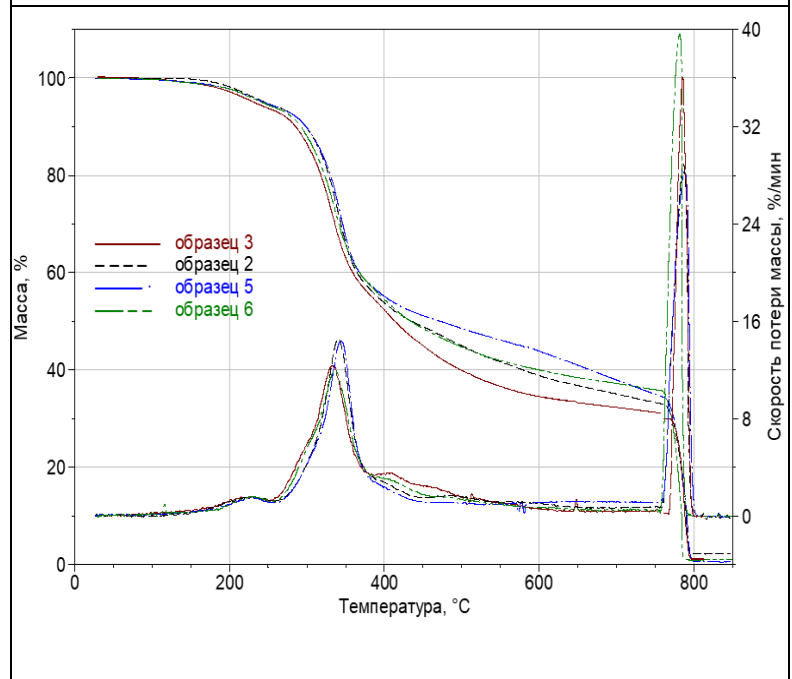


РИСУНОК 8

ЗАВИСИМОСТЬ КАЖУЩЕЙСЯ ПЛОТНОСТИ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТОВ ОТ СОДЕРЖАНИЯ ВСПЕНИВАЮЩЕГО АГЕНТА (смесь н-пентан и изопентан в соотношении 80:20)

Figure 8

Dependence of apparent density of polyisocyanurate foams on the content of foaming agent (a mixture of n-pentane and isopentane in the ratio 80:20)

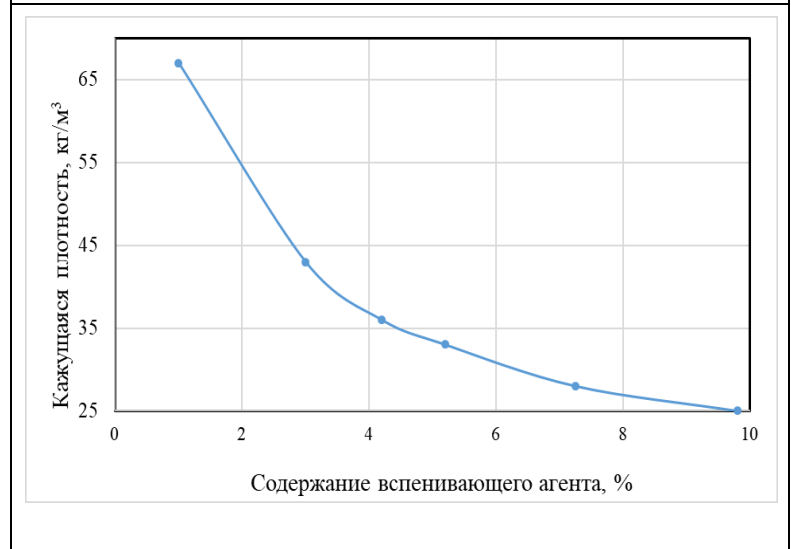


Таблица 3 ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ЗАЛИВОЧНЫХ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТОВ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ

Table 3 Heat resistance of poured polyisocyanurate foams of different densities

Показатели Indications	Содержание смеси н-пентан и изопентан, мас. %* Mixture content of n-pentane and isopentane, wt. %				
	1,0	3,0	4,3	5,38	9,7
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	66,0	43,1	37,5	33,8	25,1
Температура, °С:					
- Начала интенсивного разложения	178	183	183	177	181
- 5%-ной потери массы	177	183	187	167	168
Максимальной скорости разложения, на:					
- Первой стадии	245	244	243	226	241
- Второй стадии	246	244	242	217	230
Максимальная скорость разложения, %/мин, на:					
- Первой стадии	334	334	325	329	326
- Второй стадии	340	344	337	331	333
Потеря массы, %, в интервале температур:					
- 30-450 °С	547	546	538	553	554
- 450-800 °С	10,3	9,3	9,4	8,13	8,11
- 450-750 °С	14,5	14,4	11,9	12,1	12,3
Коксовый остаток, %	26,6	23,3	28,9	18,5	18,9
Скорость окисления кокса, %/мин	41,5	41,2	40,6	41,8	40,2
	51,2	48,9	51,5	50,6	55,2
	56,6	56,8	58,0	56,6	57,1
	15,6	16,2	12,5	18,4	13,6
	1,9	2,0	1,4	1,6	2,7
	33,2	34,9	36,0	31,0	31,2
	28,6	28,4	39,6	34,2	35,9

\* – в числителе представлены данные при нагреве ПИР на воздухе, в знаменателе – в атмосфере азота до 750 °С и до 800 °С на воздухе.

и изоциануратных групп в полимерной матрице пенопластов. В то же время максимальная скорость термоокислительного разложения ПИР на первой стадии процесса пиролиза снижается с 10,3 до 8,11 %/мин, а при термической деструкции скорость разложения составляет 11,9-14,5 %/мин, что выше скорости термоокислительной деструкции на 40,8-64,9 %. Потеря массы в интервале температур 30-450 °С при пиролизе пенополиизоциануратов в азоте и на воздухе составляет соответственно 48,9-55,2 и 40,2-41,5 %. Следует отметить, что исследованные ПИР более стойки к воздействию окислительных сред, чем к термической деструкции.

### Заключение

В результате экспериментальных исследований выявлено, что исследованные пенополиизоцианураты более устойчивы к термоокислительной деструкции по сравнению с термической деструкцией. Термические свойства указанных пенопластов зависят от соотношения изоцианат/полиол и содержания трихлорпропилфосфата. Плотность пенополиизоциануратов незначительно влияет на их термостойкость. При оптимальном содержании исходных компонентов пенополиизоцианураты обладают более высокой термостойкостью по сравнению с жесткими ППУ.

At the same time, the maximum rate of thermo-oxidative decomposition of PIR at the first stage of the pyrolysis process decreases from 10.3 to 8.11 %/min, and at thermal degradation the rate of decomposition is 11.9-14.5 %/min, which is 40.8-64.9 % higher than the rate of thermo-oxidative degradation. The mass loss in the temperature range of 30-450 °C during pyrolysis of polyisocyanurate foams in nitrogen and in air is 48.9-55.2 and 40.2-41.5 %, respectively. It should be noted that the investigated PIRs are more resistant to oxidizing media than to thermal degradation.

### Conclusions

Experimental studies revealed that the studied polyisocyanurate foams are more resistant to thermo-oxidative degradation compared to thermal degradation. The thermal properties of the above foams depend on the isocyanate/polyol ratio and trichloropropyl phosphate content. The density of polyisocyanurate foams insignificantly influences their thermal stability. At optimum content of initial components, polyisocyanurate foams have higher heat resistance in comparison with rigid PPU.

**Литература:**

1. Берлин А.А., Шутов Ф.А. Пенополимеры на основе реакционноспособных олигомеров. – М.: Химия, 1978. – 296 с.
2. Берлин А.А., Шутов Ф.А. Химия и технология газонаполненных высокополимеров. – М.: Химия, 1980. – 503 с.
3. Чистяков А.М. Легкие многослойные ограждающие конструкции. – М.: Стройиздат, 1987. – 144 с.
4. Клемпнер Д. Полимерные пены и технология их вспенивания: пер. с англ., под ред. А. М. Чеботаря. – СПб: Профессия, 2009. – 600 с.
5. Гурьев В.В., Никитин В.Н., Кофанов В.А. Учет особенностей ячеистой структуры при анализе расчетной теплопроводности газонаполненных полимерных материалов // Промышленное и гражданское стр-во. – 2018. - №9. – с. 98-104.
6. Гурьев В.В., Жуков А.Д., Еремеев В.Е., Жолудов В.С., Семенов В.С., Боброва Е.Ю. Тепловая изоляция в промышленности. Теория, материалы и системы изоляции. – М.: НИУ МГСУ, 2021. – 184 с.
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. Аралов Е.С., Кулицкий Б.М., Бугаевский Д.О. Эффективность теплоизоляционных материалов, применяемых при строительстве наружных ограждающих конструкций // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2021. - №4(25). – С. 26-31.
9. Серебрякова В.А. Сравнительный анализ теплоизоляционных материалов, используемых в гражданском строительстве // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2019. – № 1. – С. 49–55.
10. Федосов С.В., Малбиев С.А., Кусенкова А.А. и др. Состояние и перспективы применения полимерных теплоизоляционных материалов в строительстве // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 3. – С. 26–43.
11. Сапрыкин Г.П., Максименко А.Т. Перспективы применения новых теплоизоляционных материалов в современном строительстве // Вестник СевКавГТИ. – 2009. – № 9. – С. 37–39.
12. Местников, А. Е. Прогнозирование структуры и свойств терморезактивных пенопластов с использованием теории теплоустойчивости // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 11-2. – С. 299-304.
13. Копылов И. А. PUR и PIR - новые для России теплоизоляционные материалы // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века – 2016. – №. 7-8. – С. 16-19.
14. Глотова Ю.В. Изделия из пенополиизоцианурата в строительных системах // Бюллетень науки и практики. – 2016. - №4. – с. 82-85.
15. Сиренко В.С., Кандырин Л.Б., Суриков П.В. Моделирование термодеструкции полиуретанов и эпоксидной смолы в инертной атмосфере // Вопросы атомной науки и техники, Серия: ядерное приборостроение. - 2003. - Выпуск 1/20. - С. 1-8.
16. Нестеров С.В., Бакирова И.Н., Самуилов Я.Д. Термическая и термоокислительная деструкция полиуретанов: механизмы протекания, факторы влияния и основные методы повышения термической стабильности. Обзор по материалам отечественных и зарубежных публикаций // Вестник Казанского технологического университета. - 2011. - №14. - С. 10-23.
17. Захарян Е.М., Максимов А.Л. Пиролиз полиуретанов. Особенности процесса и состав продуктов реакции (обзор) // Журнал прикладной химии. – 2022. – Том 95. – Выпуск 2. – С. 164-230.

**References:**

1. Berlin A.A., Shutov F.A. Foam-polymers on the basis of reactive oligomers. - Moscow: Khimiya, 1978. - 296 c.
2. Berlin A.A., Shutov F.A. Chemistry and technology of gas-filled high polymers. - Moscow: Khimiya, 1980. - 503 c.
3. Chistyakov A.M. Light Multilayer Enclosing Structures. - M.: Stroyizdat, 1987. - 144 c.
4. Klemmpner D. Polymer foams and technology of their foaming: per. from Engl. ed. by A.M. Chebotar. - SPb: Profession, 2009. - 600 c.
5. Guriev, V.V.; Nikitin, V.N.; Kofanov, V.A. Taking into account the features of the cellular structure when analyzing the calculated thermal conductivity of gas-filled polymer materials // Industrial and civil engineering. - 2018. - №9. - c. 98-104.
6. Guriev V.V., Zhukov A.D., Eremeev V.E., Zholudov V.S., Semyonov V.S., Bobrova E.Yu. Thermal insulation in industry. Theory, Materials and Systems of Insulation. - M.: NIU MGSU, 2021. - 184 c.
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. Aralov, E.S.; Kulitskiy, B.M.; Bugaevskiy, D.O. Efficiency of the heat-insulating materials used in the construction of the external enclosing structures (in Russian) // Town-planning. Infrastructure. Communications. - 2021. - №4(25). - C. 26-31.
9. Serebryakova, V.A. Comparative analysis of thermal insulation materials used in civil engineering // High technologies in the construction complex. - 2019. - № 1. - C. 49-55.
10. Fedosov S.V., Malbiev S.A., Kusenкова A.A. et al. State and prospects of application of polymeric heat-insulating materials in construction // Bulletin of Volga Region State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. - 2018. - № 3. - C. 26-43.
11. Saprykin, G.P.; Maksimenko, A.T. Prospects of new heat-insulating materials application in modern construction (in Russian) // Vestnik SevKavGTI. - 2009. - № 9. - C. 37-39.
12. Mestnikov, A. E. Prediction of the structure and properties of thermosetting foams using the theory of heat resistance // Modern Science-Intensive Technologies. - 2020. - № 11-2. - C. 299-304.
13. Kopylov I. A. PUR and PIR - new for Russia thermal insulation materials // Building materials, equipment, technologies of the XXI century - 2016. - №. 7-8. - C. 16-19.
14. Glotova Yu.V. Products from polyisocyanurate foam in building systems // Bulletin of science and practice. - 2016. - №4. - c. 82-85.
15. Sirenko, V.S.; Kandyrin, L.B.; Surikov, P.V. Modeling of thermo-destruction of polyurethanes and epoxy resin in an inert atmosphere (in Russian) // Voprosy atomnoy nauki i tekhnika, Serie: nuclear instrumentation. - 2003. - Issue 1/20. - C. 1-8.
16. Nesterov S.V., Bakirova I.N., Samuilov Y.D. Thermal and thermo-oxidative degradation of polyurethanes: mechanisms of occurrence, factors of influence and the main methods of increasing thermal stability. Review of domestic and foreign publications // Bulletin of Kazan Technological University. - 2011. - №14. - C. 10-23.
17. Zakharyan E.M., Maksimov A.L. Pyrolysis of polyurethanes. Features of the process and composition of reaction products (review) // Journal of Applied Chemistry. - 2022. - Vol. 95. - Issue 2. - C. 164-230.

18. Мельников В.С., Кириллов С.В., Мельников М.В., Васильев В.Г., Ванин С.А., Потемкин С.А. Пожарно-структурная экспертиза повреждений теплоизоляционных материалов из минеральной ваты и пенополиизоцианурата // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. - Том 8. - №3. – с. 1-49.

18. Melnikov V.S., Kirillov S.V., Melnikov M.V., Vasiliev V.G., Vanin S.A., Potemkin S.A. Fire-structural examination of damage to thermal insulation materials made of mineral wool and polyisocyanurate foam // Internet journal "Naukovlenie". - 2016. - Vol. 8. - №3. - с. 1-49.

---

**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».**

**Ушков Валентин Анатольевич** – доктор технических наук, заведующий лабораторией современных композиционных строительных материалов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), E-mail: [VA.ushkov@yandex.ru](mailto:VA.ushkov@yandex.ru)

**Нагановский Юрий Кузьмич** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, E-mail: [reut11731@mail.ru](mailto:reut11731@mail.ru)

**Золотарев Михаил Евгеньевич** – аспирант кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), E-mail: [egaandmisha9@gmail.com](mailto:egaandmisha9@gmail.com) (автор для связи)

**Вклад авторов:** Ушков В.А. - идея, научное руководство, научное редактирование статьи; Нагановский Ю.К. – разработка методик, обработка материала, написание статьи; Золотарев М.Е. – обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Ushkov V.A.** – Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Modern Composite Building Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), E-mail: [VA.ushkov@yandex.ru](mailto:VA.ushkov@yandex.ru)

**Naganovskii Yu.K.** – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO; E-mail: [reut11731@mail.ru](mailto:reut11731@mail.ru)

**Zolotarev M.E.** – Postgraduate student of the Department of Construction Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), E-mail: [egaandmisha9@gmail.com](mailto:egaandmisha9@gmail.com) (author for contact)

**Contribution of the author:** Ushkov V.A. - idea, scientific guidance, scientific editing of the article; Naganovskii Yu.K. - development of methods, processing of material, writing of the article; Zolotarev M.E. - processing of material, writing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.