

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ НА СВОЙСТВА ЖЕСТКИХ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВ

М.П. Красновских, В.Г. Пономарев, И.Г. Мокрушин

Марина Павловна Красновских (ORCID 0000-0002-5187-5590)*

Кафедра неорганической химии, химической технологии и техносферной безопасности, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, Российская Федерация, 614990

Научно-производственное предприятие СИНТЕЗ, ул. Воронежская, 58, Пермь, Российская Федерация, 614034

E-mail: krasnovskih@yandex.ru*

Владимир Георгиевич Пономарев (ORCID 0000-0001-9626-0517)

Научно-производственное предприятие СИНТЕЗ, ул. Воронежская, 58, Пермь, Российская Федерация, 614034

E-mail: pvg-promchim@mail.ru

Иван Геннадьевич Мокрушин (ORCID 0000-0002-4095-8366)

Кафедра неорганической химии, химической технологии и техносферной безопасности, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, Российская Федерация, 614990

E-mail: mig@psu.ru

В статье рассмотрены свойства жестких пенополиуретанов (ППУ), полученных с применением различных экологически безопасных физических вспенивателей (циклопентан, циклоизопентановые смеси (ЦИП), метилалль, метилформиат и метилтретбутиловый эфир). При проведении технологической пробы - получении лабораторных образцов свободного вспенивания - существенных различий в применении различных вспенивающих агентов не отмечено. В ходе дальнейшего исследования подтверждено, что физико-механические свойства готовой пены существенно зависят от типа газа, находящегося в закрытых ячейках материала. Установлено, что в случае вспенивания циклопентаном и циклоизопентановыми композициями введение изопентана обеспечивает увеличение прочности готовых пен на сжатие в горизонтальном направлении в соответствии с направлением подъема пены. Кроме того, отмечено, что пенопласты, вспененные метилаллем и метилформиатом, имеют самые низкие значения прочности на сжатие. Также была отмечена небольшая разница и в теплопроводности вспененных изделий. Самые низкие значения теплопроводности в настоящем исследовании отмечены у пен на основе циклопентана и циклоизопентановых смесей. Пены, полученные с применением углеводородных вспенивателей, имеют мелкоячеистую структуру без дефектов, раковин и пустот. При сравнительном анализе показано, что в случае применения циклопентана и ЦИП смеси пенополиуретановых компонентов обладают хорошей текучестью, что способствует равномерному заполнению формы и снижению потерь при заливке. Представляло интерес установить изменение теплопроводности готовых изделий на основе циклопентана и ЦИП с течением времени. Экспериментально было установлено, что по прошествии 500 дней теплопроводность образцов увеличилась и достигла равных значений. Этот эффект связан с диффузией молекул вспенивающего компонента через стенки ячеек пены, в результате чего воздух с гораздо более высоким коэффициентом теплопроводности диффундирует в ячейки. На основании проведенной работы циклоизопентановые смеси могут быть рекомендованы в качестве вспенивающих компонентов при получении пенополиуретановой теплоизоляции.

Ключевые слова: пенополиуретан, холодильная теплоизоляция, физико-химические свойства, прочность, теплопроводность, физические вспенивающие агенты, пентаны

PHYSICAL FOAMING AGENT INFLUENCE ON RIGID POLYURETHANE FOAMS PROPERTIES

M.P. Krasnovskikh, V.G. Ponomarev, I.G. Mokrushin

Marina P. Krasnovskikh (ORCID 0000-0002-5187-5590)*

Department of Inorganic Chemistry, Chemical Technology and Technosphere Safety, Perm State National Research University, Bukireva st., 15, Perm, 614990, Russia

Scientific and Production Enterprise SINTEZ, Voronezhskaya st., 58, Perm, 614034, Russia

E-mail: krasnovskikh@yandex.ru*

Vladimir G. Ponomarev (ORCID 0000-0001-9626-0517)

Scientific and Production Enterprise SINTEZ, Voronezhskaya st., 58, Perm, 614034, Russia

E-mail: pvg-promchim@mail.ru

Ivan G. Mokrushin

Department of Inorganic Chemistry, Chemical Technology and Technosphere Safety, Perm State National Research University, Bukireva st., 15, Perm, 614990, Russia

E-mail: mig@psu.ru

The article discusses the properties of rigid polyurethane foams (PU foams) obtained with the use of various environmentally friendly physical foaming agents - cyclopentane, cycloisopentane mixtures (CIP), methylal, methyl formate and methyl tert-butyl ether. No significant differences were noted in the use of various blowing agents during technological samples free foaming. In the course of further research, it was confirmed that the physical and mechanical properties of the finished foam significantly depend on the type of gas in the closed cells of the material. Foams obtained with the use of hydrocarbon blowing agents have a fine-meshed structure without defects, cavities and voids. It has been established that in the case of foaming with cyclopentane and cycloisopentane compositions, the introduction of isopentane provides an increase in the strength of the finished foams in compression in the horizontal direction in accordance with the direction of foam rise. It is also noted that materials foamed with methylal and methyl formate have the lowest compressive strength values. A slight difference was also noted in the thermal conductivity of the foamed products. The lowest values of thermal conductivity in the present study were noted for foams based on cyclopentane and cycloisopentane mixtures. It was also of interest to establish the change in the thermal conductivity of finished products based on cyclopentane and CIP over time. Experimentally found that after 500 days the thermal conductivity of the samples increased and reached equal values. This effect is due to the diffusion of the foaming component molecules through the walls of the foam cells, as a result of which air with a much higher thermal conductivity coefficient diffuses into the cells. It was shown in a comparative analysis that the mixtures of polyurethane foam components have good fluidity in the case of cyclopentane and cycloisopentane use, which contributes to uniform filling of the mold and reduction of losses during pouring. Based on the work done, cycloisopentane mixtures can be recommended as foaming components in the production of polyurethane foam insulation.

Key words: polyurethane foam, refrigeration thermal insulation, physical and chemical properties, strength, thermal conductivity, physical blowing agents, pentanes

Для цитирования:

Красновских М.П., Пономарев В.Г., Мокрушин И.Г. Влияние физического пенообразователя на свойства жестких пенополиуретанов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 90–97. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6657.

For citation:

Krasnovskikh M.P., Ponomarev V.G., Mokrushin I.G. Physical foaming agent influence on rigid polyurethane foams properties. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 11. P. 90–97. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6657.

ВВЕДЕНИЕ

Вспененные закрытоячеистые жесткие полиуретаны в настоящее время широко известны и

применимы в разных областях техники, в том числе и в качестве изоляционного материала. Пенополиуретан (ППУ) хорошо зарекомендовал себя в изоляции холодильных и морозильных камер,

теплоизоляции труб, резервуаров, химических реакторов в установках на производстве. Кроме того, пенополиуретан с успехом применяется качестве изоляционного материала в строительной индустрии. К жесткому пенополиуретану предъявляются индивидуальные требования в зависимости от сферы применения. Материал, используемый в холодильной изоляции, должен соответствовать следующему ряду требований: однородная структура – ячейка должна быть определенного среднего размера с невысокими отклонениями; невысокий процент пустот для обеспечения необходимой толщины изоляции; содержание закрытых ячеек должно составлять не менее 90%; должен обладать достаточной жесткостью, поскольку изоляционный материал работает в основном на сжатие. Кроме того, для придания необходимой энергоэффективности готовому холодильному оборудованию ППУ изоляция должна обладать необходимой теплопроводностью [1].

Все больший интерес представляет исследование свойств пенопластов, в том числе пенополиуретанов, в производстве которых используются конденсирующиеся пенообразователи – это вещества (однокомпонентные углеводороды, фреоны, в том числе и гидрохлорфторуглероды (ГХФУ) и многокомпонентные смеси), температуры перехода в газовую фазу которых находятся диапазоне (-60...+90 °С), что является рабочим диапазоном температур эксплуатации теплоизоляции [2-6].

Известно, что к 2015 г. на территории России прекращено применение порядка 90% продуктов, содержащих гидрохлорфторуглероды, к 2030 г. планируется 100% сокращение ГХФУ [7]. Сложившаяся ситуация и введенные ограничения приводят производителей жестких ППУ к поиску и введению новых вариантов вспенивающих компонентов, например, углеводородов (УВ), метилала, применению водного вспенивания и др. [8-10]

Каждый вариант вспенивания имеет преимущества и недостатки. Хорошо зарекомендовали себя углеводородные вспениватели. Так, производителями трубной изоляции отмечено, что трубы с ППУ, полученным с применением углеводородов, обладают более низким коэффициентом теплопроводности, нежели полученные при вспенивании водой, также у пен на основе УВ вспенивателей фиксируется улучшенная адгезия к поверхностям. Кроме того, пены на основе углеводородных вспенивателей показывают стабильность своих теплофизических параметров на всем сроке эксплуатации трубопровода и соответствуют требованиям экологии [11, 12].

Теплопроводные свойства вспененных теплоизоляционных материалов являются аддитивной величиной, включающей в себя теплопроводности непосредственного полимерного материала-основы и компонентов теплопроводности газовой смеси, заполняющей поры, а также величины теплопроводности и конвекции [4, 5]. Исследования показывают, что основной вклад (порядка 50%) в теплопроводность пенопласта вносит заключенный в поры газ [5], соответственно немаловажную роль в свойства вспененного полиуретана вносит применяемый вспенивающий агент. В большинстве случаев теплопроводность вспенивающих компонентов ниже теплопроводности воздуха [13]. Также при изготовлении полиуретановых пен из полиола и изоцианата на основе физического вспенивающего агента для улучшения теплоизоляционных свойств и урегулирования теплопроводности применяются различные пеностабилизаторы и поверхностно-активные вещества [14].

Стоит отметить, что по комплексному сочетанию свойств вспененные жесткие пенополиуретаны являются лидерами в теплоизоляции многих изделий и оборудования, а надежность и экономичность ППУ определяет широкое практическое применение в холодильной промышленности [15]. Поэтому изучение теплофизических свойств пенополиуретановых материалов при применении различных физических вспенивающих агентов представляется весьма актуальным.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Характеристики применяемых компонентов:

Для проведения экспериментов были задействованы компоненты, применяемые в производстве бытовых холодильников с преимущественно коротким временем старта пены:

- компоненты «А»: Wanefoam RCP6115-101 (производства Wanhua), DSD 453.0, Pascal SV1117 (производства Dow Isolan).

- компоненты «В»: Wannate PM-200, (производства Wanhua), Voratec SD 100, Voranate M 229 (производства Dow Isolan).

Данные компоненты предназначены для работы с физическими вспенивателями, могут считаться аналогами, поскольку несущественно отличаются друг от друга рядом параметров, таких как вязкость, гидроксильное число, процентное содержание NCO-групп, цветность. Компоненты обеспечивают работоспособность, текучесть и хорошее извлечение из формы.

Характеристики исследуемых физических вспенивателей (компоненты «С») представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики используемых вспенивателей
Table 1. Characteristics of blowing agents (component "C")

Комп. «С»	Коммерческий продукт (химическое название, состав)	М, г/моль	t кип., °С
1	Циклопентан	70	49
2	Смесь циклоизопентановая 70/30 (Циклопентан (70%) / 2-метилбутан (30%))	70,6	49 28
3	Смесь циклоизопентановая 60/40 (Циклопентан (60%) / 2-метилбутан (40%))	70,8	49 28
4	Смесь циклоизопентановая 50/50 (Циклопентан (50%) / 2-метилбутан (50%))	71	49 28
5	Метилаль (Диметоксиметан)	76	42
6	Метилформиат	60	32
7	Метилтретбутиловый эфир (2-метил-2-метоксипропан)	88	55

Подготовка образцов пены

Работа проводилась в два этапа. На первоначальном этапе осуществлялась технологическая проба для каждого состава вспенивателя, выбранного на основе технической документации: на 100 массовых частей компонента «А» брали 140-150 массовых частей компонента «В» и 12-14 массовых частей исследуемого вспенивателя – компонента «С». Смесь с заданными пропорциями перемешивали верхнеприводной мешалкой со скоростью 1,5-2,0 тыс.об/мин в течение 5 с до начала подъема пены, после чего оставляли в лабораторном стакане, фиксировали время старта и время гелеобразования. Затем выдерживали пену в течение 2-4 ч часов, после чего обрабатывали до нужных размеров для дальнейшего исследования плотности свободного вспенивания.

На втором этапе образцы готовили следующим способом: смесь с теми же заданными пропорциями интенсивно перемешивали с помощью лабораторной мешалки при скорости 1,5-2,0 тыс.об/мин в течение 5 с до начала подъема пены, после чего, полученную композицию заливали в форму. Подготовленная для испытаний пена выдерживалась в течение 1 сут при комнатной температуре. Затем для каждого вида испытаний вырезались образцы необходимых размеров. Количество компонентов для заливки в форму рассчитывалась исходя из необходимой плотности образцов 34-36 кг/м³.

Методы тестирования

Далее подготовленные образцы ППУ кондиционировали при постоянной температуре и определяли прочность на сжатие согласно ГОСТ 17177-94 с помощью малогабаритного пресса ПМ-ЗМГ4 (при 10% деформации по направлению

вспенивания) и коэффициент теплопроводности с помощью прибора для определения теплопроводности ИТП-МГ4-250 по методике [16]. Структуру ячеек готовой пены анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N. Текучесть пены в форме проверяли по методике лаборатории Дау-Изолан.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс вспенивания является одним из важнейших этапов синтеза пористых полиуретановых материалов. На этом этапе происходит образование ячеек и формирование пористой структуры. Образующаяся структура во многом определяет физико-механические свойства пенополиуретанов, в том числе такие важные, как прочность изделия и теплопроводность. Вторым важным элементом, влияющим на характеристики, является газ, которым заполнены пенополиуретановые ячейки.

Начальное исследование влияния применяемых и потенциально применимых физических вспенивающих агентов на процесс вспенивания проводилось с помощью метода технологической пробы [17], в табл. 2 представлены полученные данные. Эффективность работы ППУ-системы зависит от скоростей химических реакций реагирующих компонентов, кинетических характеристик при образовании пор и полимерной структуры изделия.

Таблица 2

Данные, полученные при технологической пробе ППУ теплоизоляции с различными вспенивающими компонентами

Table 2. Data of technological sampling of polyurethane foam insulation with various foaming components

Комп. «С»	Характеристика			
	t смеси, °С	Время старта, с	Время гелеобр., с	Плотность свобод. вспенивания, кг/м ³
1	20-25	5,5-6,0	75-78	26,2
2	20-25	5,0-5,5	74-76	26,4
3	20-25	5,0-5,5	74-76	26,8
4	20-25	5,0	75-77	26,6
5	20-25	5-5,5	73-75	26,4
6	20-25	5-5,5	72-74	24,6
7	20-25	6,0-6,5	76-78	29,2

При получении лабораторных образцов свободного вспенивания существенных различий в применении различных вспенивающих агентов не установлено за исключением незначительного снижения времени старта при введении в композицию изопентана с меньшей температурой кипения. Кажущаяся плотность в случае пористых материалов

является наиболее важным свойством для контроля механических и теплоизоляционных свойств. Значения кажущейся плотности для всех полученных пен с разными типами вспенивателя, одинаковы и находятся в диапазоне 24-30 кг/м³, что позволяет сравнивать механические и термические свойства конечных продуктов. Зафиксировано незначительное повышение кажущейся плотности при вспенивании метилтретбутиловым эфиром и снижение плотности при вспенивании метилформиатом.

В табл. 3 представлены физико-механические показатели описываемых образцов вспененных материалов, потенциально применимых для теплоизоляции.

Таблица 3

Физико-механические показатели образцов ППУ при использовании разных вспенивающих агентов
Table 3. Physical and mechanical properties of polyurethane foam samples obtained using different blowing agents

Комп. «С»	Параметры		
	Плотность образцов, кг/м ³	Прочность на сжатие (10% лин. деформ.), МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С (при 25 °С)
1	34-36	0,143	0,023
2	34-36	0,168	0,024
3	34-36	0,176	0,025
4	34-36	0,180	0,025
5	34-36	0,050	0,027
6	34-36	0,075	0,028
7	34-36	0,135	0,028

Прочность на сжатие пенополиуретанов определяется как давление, необходимое для 10% деформации исходного размера испытуемых образцов, и тесно связана с его стабильностью размеров. Минимальная прочность на сжатие для обеспечения размерной стабильности для пенопластов должно быть больше 0,1 МПа [18].

Что касается влияния типа вспенивающего агента, то отмечено, что введение изопентана обеспечивает увеличение прочности готовых пен на сжатие в горизонтальном направлении в соответствии с направлением подъема пены. Также было отмечено, что пенопласты, вспененные метилалем и метилформиатом, имеют самые низкие значения прочности на сжатие. Вероятно, это происходит за счет эффекта пластификации полиуретановой матрицы. То есть, добавление метилалаля и метилформиата приводят к снижению прочности готовой пены и к увеличению начальной усадки.

Определение коэффициента теплопроводности образцов показало, что самые низкие значения теплопроводности в настоящем исследовании отмечены у пен на основе циклопентана и циклоизопентановых смесей. Теплопроводности пен, полученные с применением метилформиата, метилалаля и метилтретбутилового эфира, имеют более высокие значения (табл. 3).

Для определения качества заполнения форм при производстве изделий была протестирована текучесть компонентов. По методике фиксируется расстояние, которое заполняется пеной в процессе вспенивания, а также особое внимание уделяется внешнему виду пены.

При работе с рецептурами описываемых композиций на основе метилформиата и метилтретбутилового эфира отмечается затрудненное растекание композиции. В случае применения метилалаля отмечается уменьшение вязкости компонента А и повышение текучести, однако при внешнем осмотре сформированной пены отмечается неравномерность структуры, большое количество пустот и каверн. Также отмечено усиленное «прилипание» образцов на основе метилформиата и метилалаля к форме, искажение и деформации.

По сравнительном анализе текучести замечено закономерное увеличение длины образцов с повышением доли вводимого изопентана в смесь с циклопентаном по сравнению с начальной длиной образца, вспененного чистым циклопентаном, вид образцов представлен на рис. 1.



Рис. 1. Заливка образцов с различными вспенивающими агентами в форму на определение текучести пены (все образцы имеют одинаковую массу заливки)

Fig. 1. Pouring samples with different blowing agents into a foam flow test (all samples have the same mass)

Композиции с применением циклопентана и ЦИП смесей обладают хорошей текучестью, что способствует равномерному заполнению формы и обеспечивает наименьшие потери при заливке. Применение данных пенообразователей обеспечит высокую степень созревания пены и необходимые

Таблица 4

Данные по теплопроводности образцов ППУ, вспененных циклопентаном и циклоизопентановой смесью (70/30), сразу после изготовления и через 500 дней

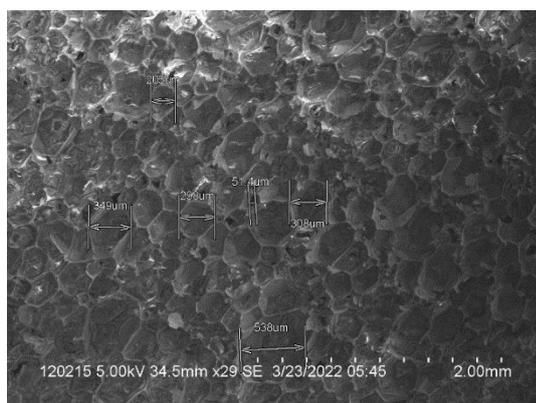
Table 4. Thermal conductivity data of polyurethane samples foamed with cyclopentane and cycloisopentane mixture (CIP 70/30) immediately after manufacture and after 500 days

Комп. «С»	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С (при 25 °С)	
	Сразу после изготовления образцов	Через 500 дней после изготовления образцов
ЦП	0,023	0,030
ЦИП 70/30	0,024	0,030

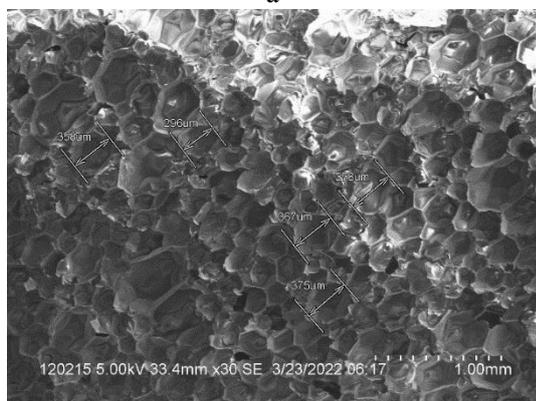
физико-механические свойства. Кроме того, весьма важным фактором является соблюдение режимов запенивания для обеспечения качественной адгезии пенополиуретана к холодильным формам, необходимо точное и выверенное соотношение и дозирование компонентов, хорошее смешивание и поддержание необходимой температуры формы [19].

Размер и форма ячеек ППУ определяют механические свойства пены. В пенопласте с маленькими и равномерными ячейками сжимающие напряжения распределяются на более многочисленные структуры, нежели в пенопластах с более крупной ячеистой структурой. Меньший размер ячеек в структуре обеспечивает высокое значение прочности на сжатие, а также более низкую теплопроводность.

Поэтому, в ходе работы был определен внешний вид ячеек ППУ, вспененного циклопентаном и циклоизопентановой смесью 70/30. Внешний вид среза ППУ изделий представлены на рис. 2. Отмечено, что введение в циклопентан изопентана не оказало существенного влияния на форму и средний размер ячеек. ППУ имеет мелкаячеистую структуру без раковин и пустот.



а



б

Рис. 2. Фотографии среза ППУ изделия, полученные с помощью СЭМ: пена на основе циклопентана (а) и ЦИП 70/30 (б)
Fig. 2. Product cutaway SEM photos: foam based on cyclopentane (a) and cycloisopentane blend (CIP 70/30) (b)

Также представляло интерес установить изменение теплопроводности готовых изделий с течением времени. У изделий, вспененных ЦП и ЦИП 70/30, были измерены коэффициенты теплопроводности сразу после изготовления и после 500 дней хранения в сухом вентилируемом темном помещении при температуре 20 °С. Данные представлены в табл. 4.

Экспериментально было установлено, что по прошествии 500 дней теплопроводность образцов увеличилась и достигла равных значений. Этот эффект связан с диффузией молекул вспенивающего компонента через стенки ячеек пены, в результате чего воздух с гораздо более высоким коэффициентом теплопроводности диффундирует в ячейки. То есть, в процессе старения пены будет наблюдаться замещение физического вспенивателя кислородом и азотом в ячейках ППУ. Данный факт подтверждается исследованиями зависимости теплопроводности полимерных пористых материалов от времени, которая наблюдается вследствие изменения состава газов в газонаполненных теплоизоляционных материалах [20, 21].

ВЫВОДЫ

В рамках данной работы были исследованы физико-механические характеристики пенополиуретановых материалов, полученных на основе различных физических вспенивателей и компонентов, применяемых в холодильной промышленности. Исследовано влияние вспенивающих агентов на теплоизоляционные и технологические свойства. Показано, что при применении циклоизопентановых смесей ППУ изделия обладают требуемыми физико-механическими свойствами, соответственно данные вспенивающие компоненты могут быть применены при получении теплоизоляции бытовых и торгово-промышленных холодильников и ларей.

При эксплуатации готовых изделий, содержащих ППУ, а также при формировании выводов и рекомендаций немаловажно учитывать большое количество дополнительных условий, которые могут отличаться при проведении лабораторных испытаний и при реальной эксплуатации вспененной теплоизоляции. Для уменьшения диффузии, сохранения газового состава в ячейках пены и сохранения теплопроводности необходимо использовать металлическую изоляцию, препятствующую выходу газа из ячеек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурова З.А., Декуша Л.В., Воробьев Л.И. Исследование материалов для эффективной тепло- и холодоизоляции холодильных и морозильных камер. *Науч. труды SWorld*. 2015. Т. 10. № 3. С. 88-92.
2. Norton F.J. Thermal Conductivity and life of polymer foams. *J. Cell. Plast.* 1967. V. 3. N 1. P. 23-37. DOI: 10.1177/0021955X6700300101.
3. Briscall H., Thomas C.R. Cellular structure and physical properties of plastics. *Brit. Plast.* 1968. V. 41. N 7. P. 79-84.
4. Ball G.W., Healy W.G., Partington J.B. The Thermal Conductivity of Isocyanate-based Rigid Cellular Plastics: Performance in Practice. *Eur. J. Cell. Plast.* 1978. V. 1. N 1. P. 50-63.
5. Jeffs G.M.F., Sparrow D.J. Progress in the Reduction & Elimination of the Use of CFC-s in Rigid Polyurethane Foam. *Cell Polym.* 1990. V. 9. N 4. P. 253-277.
6. Христофорова И.А., Христофоров А.И. Исследование формирования пористых структур на основе ПВХ. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 5. С. 84-88. DOI: 10.6060/ivkkt.20206305.6084.
7. Лучкина Л.В., Никифорова Г.Г., Васильев В.Г., Романов С.В. Исследование физико-механических свойств лабораторных и промышленных образцов теплоизоляционных материалов, применяемых для производства предизолированных труб, фасонных изделий и скрупок. *Пласт. массы*. 2019. Т. 1. № 11-12. С. 50-55. DOI: 10.35164/0554-2901-2019-11-12-50-55.
8. Мельников В.С., Ванин С.А., Мельников М.В. Суперпозиция факторов теплопроводности строительных пенополиуретанов и пенополиизоциануратов. *Вестник евразийской науки*. 2017. Т. 9. № 3 (40). С. 30.
9. Kurańska M., Prociak A., Michałowski S., Zawadzińska A. The influence of blowing agents type on foaming process and properties of rigid polyurethane foams. *Polymer*. 2018. V. 63. DOI: 10.14314/polimery.2018.10.2.
10. Choe K.H., Lee D.S., Seo W.J., Kim W.N. Properties of rigid polyurethane foams with blowing agents and catalysts. *Polymer J.* 2004. V. 36. N 5. P. 368-373. DOI: 10.1295/polymj.36.368.
11. Василенко В.В. О преимуществах изделий в ППУ изоляции, изготовленных с применением циклопентана. *Строительство и архитектура-2015*. 2015. С. 183-186.
12. Сиразетдинов К.И. Применение двухслойной конструкции тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей с использованием пенополиуретана. *Аллея науки*. 2017. Т. 3. № 9. С. 268-271.
13. Воронин А. Анализируй теплопроводность. *Кровель. изоляц. материалы*. 2017. № 1. С. 41-43.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2022 г.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Funding: The research was supported by the Perm Research and Education Centre for Rational Use of Subsoil, 2022.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. Burova Z.A., Dekusha L.V., Vorob'ev L.I. Study of materials for effective heat and cold insulation of refrigerators and freezers. *Nauch. Trudy SWorld*. 2015. V. 10. N 3. P. 88-92 (in Russian).
2. Norton F.J. Thermal Conductivity and life of polymer foams. *J. Cell. Plast.* 1967. V. 3. N 1. P. 23-37. DOI: 10.1177/0021955X6700300101.
3. Briscall H., Thomas C.R. Cellular structure and physical properties of plastics. *Brit. Plast.* 1968. V. 41. N 7. P. 79-84.
4. Ball G.W., Healy W.G., Partington J.B. The Thermal Conductivity of Isocyanate-based Rigid Cellular Plastics: Performance in Practice. *Eur. J. Cell. Plast.* 1978. V. 1. N 1. P. 50-63.
5. Jeffs G.M.F., Sparrow D.J. Progress in the Reduction & Elimination of the Use of CFC-s in Rigid Polyurethane Foam. *Cell Polym.* 1990. V. 9. N 4. P. 253-277.
6. Hristoforova I.A., Hristoforov A.I. Study of the formation of porous structures based on PVC. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 5. P. 84-88 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206305.6084.
7. Luchkina L.V., Nikiforova G.G., Vasil'ev V.G., Romanov S.V. Study of the physical and mechanical properties of laboratory and industrial samples of heat-insulating materials used for the production of pre-insulated pipes, fittings and shells. *Plast. Massy*. 2019. V. 1. N 11-12. P. 50-55 (in Russian). DOI: 10.35164/0554-2901-2019-11-12-50-55.
8. Melnikov V.S., Vanin S.A., Melnikov M.V. Superposition of thermal conductivity factors of building polyurethane foams and polyisocyanurate foams. *Vestn. Evraz. Nauki*. 2017. V. 9. N 3 (40). P. 30 (in Russian).
9. Kurańska M., Prociak A., Michałowski S., Zawadzińska A. The influence of blowing agents type on foaming process and properties of rigid polyurethane foams. *Polymer*. 2018. V. 63. DOI: 10.14314/polimery.2018.10.2.
10. Choe K.H., Lee D.S., Seo W.J., Kim W.N. Properties of rigid polyurethane foams with blowing agents and catalysts. *Polymer J.* 2004. V. 36. N 5. P. 368-373. DOI: 10.1295/polymj.36.368.
11. Vasilenko V.V. About the advantages of products in polyurethane foam insulation, made using cyclopentane. *Stroitel'stvo Arhitektura-2015*. 2015. P. 183-186 (in Russian).
12. Sirazetdinov K.I. The use of a two-layer construction of thermal insulation of pipelines of heating networks using polyurethane foam. *Alleya Nauki*. 2017. V. 3. N 9. P. 268-271 (in Russian).
13. Voronin A. Analyze the thermal conductivity. *Krovel. Izol'yats. Mater.* 2017. N 1. P. 41-43.
14. Vaslyayev A.A. Study of the effect of foam stabilizers on the properties of rigid polyurethane foam based on low molecular

14. **Васляев А.А.** Изучение влияния пеностабилизаторов на свойства жесткого пенополиуретана, на основе низкомолекулярных полиолов. *Междун. студ. науч. вестн.* 2018. № 5. С. 268.
15. **Леонович И.А., Александриков А.А., Титов В.В.** Анализ основных производственных факторов, обеспечивающих долговечность ПИИ-труб для тепловых сетей. *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та.* 2017. № 2 (55). С. 142-152. DOI: 10.53078/20778481_2017_2_142.
16. Измеритель плотности ИТП-МГ4 «100». Руководство по эксплуатации. Челябинск: Реестр Систем сертификации средств измерений РФ №020080124. 2007. 33 с.
17. Retrieved March 24, 2022 from: <http://www.vladipur.ru/articles/?news=4>
18. **Hee Kim S., Lim H., Song J.C., Kim B.K.** Effect of blowing agent type in rigid polyurethane foam. *J. Macromol. Sci., Part A: Pure Appl. Chem.* 2008. V. 45. N 4. P. 323-327. DOI: 10.1080/10601320701864260.
19. **Гравит М.В., Кулешин А.С., Морозовский П.Д., Осетрова Е.С., Герасимова Е.Н.** Унификация технических характеристик жестких напыляемых PUR и PIR пен. *Строит. материалы, оборуд., технол. XXI в.* 2018. № 3 - 4. С. 30-37.
20. **Гагарин В.Г., Пастушков П.П.** Изменение во времени теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов. *Строит. материалы.* 2017. № 6. С. 28-31. DOI: 10.31659/0585-430X-2017-749-6-28-31.
21. **Yakushin V., Cabulis U., Fridrihsone V., Kravchenko S., Pauliks R.** Properties of polyurethane foam with fourth-generation blowing agent. *e-Polymers.* 2021. V. 21. N 1. P. 763-769. DOI: 10.1515/epoly-2021-0081.
- weight polyols. *Mezhdunar. Stud. Nauch. Vestn.* 2018. N 5. P. 268 (in Russian).
15. **Leonovich I.A., Aleksandrikov A.A., Titov V.V.** Analysis of the main production factors ensuring the durability of PI pipes for heating networks. *Vestn. Belorus.-Ros. Un-ta.* 2017. N 2 (55). P. 142-152 (in Russian). DOI: 10.53078/20778481_2017_2_142.
16. Density meter ITP-MG4 "100". Manual. Chelyabinsk: Register of Certification Systems for Measuring Instruments of the Russian Federation N 020080124. 2007. 33 p.
17. Retrieved March 24, 2022 from: <http://www.vladipur.ru/articles/?news=4>
18. **Hee Kim S., Lim H., Song J.C., Kim B.K.** Effect of blowing agent type in rigid polyurethane foam. *J. Macromol. Sci., Part A: Pure Appl. Chem.* 2008. V. 45. N 4. P. 323-327. DOI: 10.1080/10601320701864260.
19. **Gravit M.V., Kuleshin A.S., Morozovskij P.D., Osetrova E.S., Gerasimova E.N.** Unification of technical characteristics of rigid sprayed PUR and PIR foams. *Stroit. Mater, Oborud., Tekhnol. XXI v.* 2018. N 3 - 4. P. 30-37 (in Russian).
20. **Gagarin V.G., Pastushkov P.P.** Change of thermal conductivity of gas-filled polymeric heat-insulating materials in time. *Stroit. Mater.* 2017. N 6. P. 28-31 (in Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2017-749-6-28-31.
21. **Yakushin V., Cabulis U., Fridrihsone V., Kravchenko S., Pauliks R.** Properties of polyurethane foam with fourth-generation blowing agent. *e-Polymers.* 2021. V. 21. N 1. P. 763-769. DOI: 10.1515/epoly-2021-0081.

Поступила в редакцию 04.05.2022
Принята к опубликованию 25.08.2022

Received 04.05.2022
Accepted 25.08.2022