

Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь  
РЕСПУБЛИКАНСКОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«Институт жилища - НИПТИС им. Атаева С.С.»  
(ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «Институт жилища - НИПТИС им. Атаева С.С.»)

УДК 536.2; 697.147; 697.1

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора  
Государственного предприятия  
«Институт жилища - НИПТИС  
им. Атаева С.С.»  
доктор техн. наук



Л.Н. Данилевский

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Анализ результатов испытаний и исследований материалов предварительно изолированных труб, применяемых в Республике Беларусь и за рубежом. Расчет и сравнительный анализ плотности теплового потока от предварительно изолированных труб наиболее применяемой номенклатуры изделий, произведенных с использованием вспенивателей на водной основе и циклопентана, при подземной прокладке тепловых сетей

Договор № 04/19 от 09.01.2019

по теме:

«ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО  
ИЗОЛИРОВАННЫХ ТРУБ И ФАСОННЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ В КАЧЕСТВЕ ВСПЕНИВАТЕЛЯ ЦИКЛОПЕНТАНА  
В СРАВНЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСПЕНИВАТЕЛЯ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ»

Этап 1

(промежуточный)

2019.ОТ.978 НИР

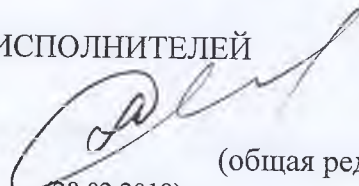
Руководитель НИР,  
доктор техн. наук

Л. Н. Данилевский

28.02.2019

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:  
доктор техн. наук



(28.02.2019)

Л. Н. Данилевский  
(общая редакция, заключение)

Исполнители темы:

Начальник НИИЦ – заведующий отраслевой лабораторией инновационных и энергоэффективных технологий в строительстве, канд. техн. наук



С.В. Терехов  
(общая редакция)

(28.02.2019)

Вед. науч. сотр.,  
канд. техн. наук



И.А. Терехова  
(разделы 1-3)

(28.02.2019)

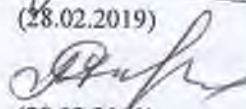
Науч. сотр.



О. В. Пивень  
(раздел 1-3)

(28.02.2019)

Нормоконтролер



(28.02.2019)

М. С. Сивая

## РЕФЕРАТ

Отчет 34 с., 11 рис., 16 табл., 14 источников

### РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ, ЛИНЕЙНАЯ ПЛОТНОСТЬ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА, КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Объект исследования – предизолированные стальные трубы с тепловой изоляцией из пенополиуретана.

Цель работы:

- анализ результатов исследования зарубежного опыта применения предварительно изолированных труб и фасонных изделий, произведенных с использованием в качестве вспенивателя циклопентана, их преимущества по сравнению с использованием других вспенивателей;
- расчет и сравнительный анализ плотности теплового потока от предварительно изолированных труб наиболее применяемой номенклатуры изделий, произведенных с использованием вспенивателей на водной основе и циклопентана, при подземной прокладке тепловых сетей.

Условия расчета: учет изменения теплопроводности пенополиуретана труб в период эксплуатации.

Методы проведения работы: расчеты плотности теплового потока и потерь теплоты при сравнении предизолированных стальных труб на разных вспенивателях выполнены для номенклатуры труб по СТБ 2252-2012 [1] для двухтрубной подземной бесканальной прокладки сетей отопления и горячего водоснабжения в условиях эксплуатации Республики Беларусь (средние климатические условия).

Результаты работы: полученные значения экономии тепловой энергии от перехода на вспениватель циклопентан будут использованы в качестве входных параметров для технико-экономического обоснования перехода к технологии с использованием циклопентана.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
1 Анализ результатов исследования зарубежного опыта применения предварительно изолированных труб и фасонных изделий, произведенных с использованием циклопентана, их преимущества по сравнению с использованием других вспенивателей .....	6
1.1 Требования к пенополиуретановой теплоизоляции ПИ-труб .....	6
1.2 Применяемые технологии производства ПИ-труб .....	6
1.3 Вспениватели и свойства пенополиуретана .....	10
2 Изменение теплопроводности пенополиуретана ПИ-труб при его старении .....	18
3 Методика и результаты расчета плотности теплового потока ПИ-труб с ППУ на водной основе (CO <sub>2</sub> ) и циклопентане .....	26
3.1 Методика расчета .....	26
3.2 Исходные данные .....	27
4 Результаты расчета .....	29
Заключение .....	32
Список использованных источников .....	33

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчет разработан отделом №7 Государственного предприятия «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С.С.» в соответствии с договором № 4/19 от 09.01.2019 г., заключенным с Ассоциацией производителей и потребителей предварительно-изолированных трубопроводов.

Теплоизоляция из жестких пенополиуретанов – один из основных элементов предварительно изолированных труб (далее- ПИ-труб), который оказывает существенное влияние на его потребительские изделия. С развитием технологии производства ПИ-труб совершенствуется оборудование, меняются компоненты смесей и пенообразователей, на основе которых изготавливается пенополиуретан (далее – ППУ) труб.

Международные соглашения по ограничению использования фреонов в целях сохранения озонового слоя оказали существенное влияние на изменение технологии производства пенополиуретанов, в том числе при производстве ПИ-труб. Другой причиной отказа от использования фреонов в технологии ПИ-труб является необходимость улучшения тепло-физических характеристик и долговечности теплоизоляции. Одним из наиболее применяемых в международной практике производства ПИ-труб в качестве компонента – пенообразователя, заменителя фреонов, является циклопентан. Обладая более низкой теплопроводностью, пенополиуретан на его основе обладает механическими и другими характеристиками, не уступающими по величине пенополиуретанам на водной основе.

Для достижения общей цели работы – технико-экономического обоснования использования ППУ на основе циклопентана – необходимо оценить эффект экономии тепловой энергии при применении ПИ-труб с ППУ на основе указанного пенообразователя.

Исходными данными для выполнения работы послужили предоставленные Заказчиком свойства ППУ на основе циклопентана, техническая литература, национальные и зарубежные ТНПА.

Структура отчета включает в себя результаты:

- анализа свойств ППУ на циклопентане в сравнении с ППУ на водной основе;
- анализа изменения теплоизоляционных свойств ППУ в условиях эксплуатации;
- расчета плотности теплового потока ПИ-труб с ППУ на водной основе и циклопентане;
- расчета экономии тепловой энергии от замены вспенивателя ППУ на водной основе (CO<sub>2</sub>) на циклопентан.

1 Анализ результатов исследования зарубежного опыта применения предварительно изолированных труб и фасонных изделий, произведенных с использованием циклопентана, их преимущества по сравнению с использованием других вспенивателей

### 1.1 Требования к пенополиуретановой теплоизоляции ПИ-труб

1.1.1 Ключевые свойства пенополиуретана – это коэффициент теплопроводности и прочность. Плотность также важна, так как она влияет на стоимость материала.

1.1.2 Согласно требованиям [1], предъявляемым к термоизоляции из жесткого пенополиуретана, теплоизоляционный материал предварительно изолированных труб должен:

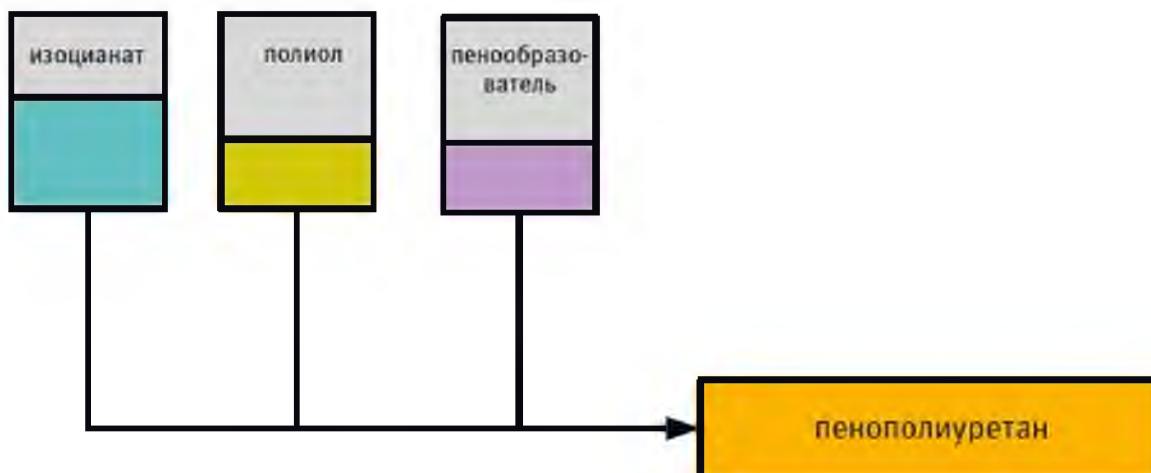
- иметь однородную структуру со средним размером ячеек в радиальном направлении не более 0,5 мм;
- пустоты не должны превышать 1/3 номинальной толщины термоизоляции;
- количество закрытых пор в пенополиуретане должно быть не менее 82 %;
- кажущаяся плотность термоизоляции должна быть не менее 60 кг/м<sup>3</sup>;
- при 10 %-ной деформации сжатия жесткого пенополиуретана напряжение должно быть не менее 0,3 МПа;
- водопоглощение по объему жесткого пенополиуретана после кипячения в течение 90 мин в дистиллированной воде должно быть не более 10 %.
- теплопроводность жесткого пенополиуретана не должна превышать 0,033 Вт/(м·К).

1.1.3 Методы контроля показателей термоизоляции из жесткого пенополиуретана представлены в [1].

1.1.4 Срок службы пенополиуретановой термоизоляции ПИ-труб зависит от температуры теплоносителя. При температуре теплоносителя до 120 °С он должен составлять не менее 30 лет [1].

### 1.2 Применяемые технологии производства ПИ-труб

1.2.1 ППУ получают путем вспенивания смеси химических веществ. При смешивании компонентов происходит реакция, в результате которой создается ячеистая структура с газонаполненными ячейками (см. схему на рисунке 1).



изоцианат + полиол + пенообразователь = пенополиуретан

Рисунок 1 – Схема компонентов для получения ППУ

1.2.2 Основным методом производства пенополиуретана состоит из следующих этапов: хранение и подготовка сырьевых материалов (включая пенообразователь); дозирование материалов (включая пенообразователь) для получения необходимой рецептуры; смешивание материалов и дозированная заливка смеси компонентов полиуретана в пресс-форму или подача смеси на конвейер для заливки в подготовленные полости изделий; и, наконец, затверждение или заключительная обработка (см. рисунок 2) [2].

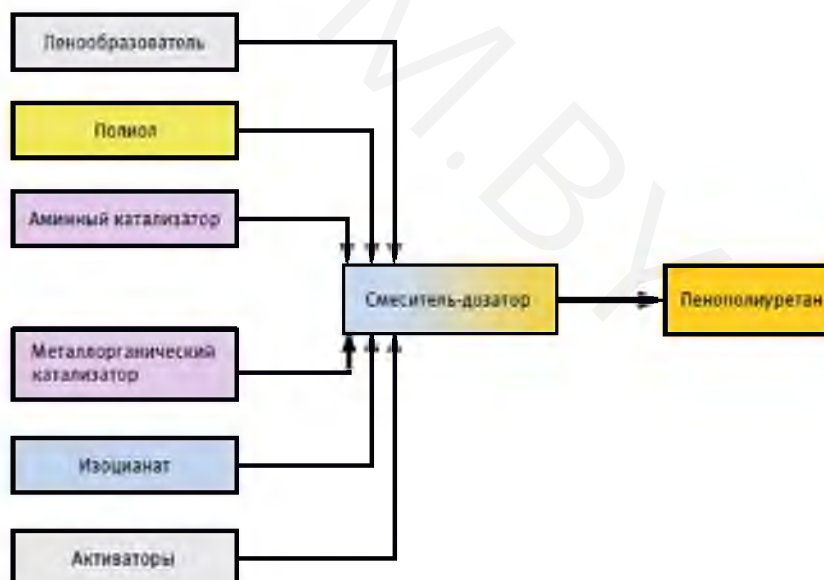


Рисунок 2 – Первичные компоненты пенополиуретана

1.2.3 Пенообразователь может быть заранее перемешан с полиолом или же добавлен в смеситель или смесительную головку под давлением. Смесь полиола и вспенивателя может быть приготовлена на месте в качестве одной из стадий производства пеноматериала или она может поставляться в бочках фирмами-поставщиками в виде готовых рецептур и полиуретановых систем (полиол и пенообразователь). Такая форма обеспечения сырьем очень важна

для мелких и небольших предприятий, которые не имеют возможности готовить свои собственные полиуретановые системы.

1.2.4 Одним из главных вопросов для использования полиуретановых систем с углеводородными пенообразователями является проблема безопасной транспортировки предварительно смешанных смесей, содержащих углеводороды.

1.2.5 Изоцианат смешивается с полиолом и пенообразователем в смесительной головке. Это может быть сделано механически, используя смеситель, оборудованный электродвигателем (заливные машины низкого давления) или в противотоке под высоким давлением (заливная машина высокого давления). Пеноматериал подается через смесительную головку, и пенообразователь, увеличиваясь в объеме, генерирует вспенивание. Отверждение полиуретана является заключительной фазой производственного процесса, в рамках которого пеноматериал стабилизируется и химическая реакция завершается.

1.2.6 ПИ-трубы получают введением перемещенных компонентов пеноизоляции в пространство между внутренней (стальной) и внешней (пластиковой) трубами. Предварительно сформованные изолирующие полуцилиндры получают путем заливки компонентов пеноизоляции в стальные пресс-формы соответствующих типоразмеров. Существуют также непрерывные процессы, в которых пеноматериал инжектируется на поверхность внутренней трубы, полимеризуется и затем внешнее покрытие образуется методом экструзии термопластичного материала.

1.2.7 По данным [3] процесс развития производства и совершенствования технологий изготовления труб в изоляции из пенополиуретана, включает ряд этапов (см. таблицу 1).  
Таблица 1 - Этапы развития производства и совершенствования технологий изготовления ПИ-труб в изоляции из ППУ [3]

Этап	Материал			Технология получения пены
	трубы	оболочки	вспениватель	
1	Качественная углеродистая сталь (сталь 10, 20)	ПЭ-60	Вспениватели на основе воды	Заливочные машины низкого давления
2	Качественные углеродистые стали (сталь 10, 20); низколегированные стали (17ГС, 17Г1С, 17Г1СУ, 09Г2С)	ПЭ 80; сшитый полиэтилен; ПЭ 100	Вспениватели на основе воды или фреона	Заливочные машины высокого давления
3	Качественные углеродистые стали, низколегированные стали, высоколегированные стали, металлопласты, стеклопластики, пластмассы	ПЭ 80; ПЭ 100; ПЭ 120; оцинкованная оболочка; гибкая гофра	Вспениватели на основе циклопентана	Специализированные заливочные машины высокого давления



1.2.8 Технология производства труб в ППУ изоляции развивалась в направлении совершенствования оборудования (его эффективности) и расширения диапазона применяемых компонентов (промышленных вспенивателей).

1.2.9 Наиболее распространены три метода производства предварительно изолированных труб [4]:

– традиционный, который включает в себя впрыск пенополиуретана в пространство между стальной трубой и трубой-оболочкой. Труба-оболочка изготавливается из полиэтиленовой трубы. Труба-оболочка из полиэтилена на стадии производства может быть дополнительно оборудована дополнительным слоем, так называемым диффузионным барьером (см. рис. 3).



1 – полиэтилен низкого давления высокой плотности; 2 – адгезионный слой; 3 – EVOH; 4 – клеевой слой; 5 – диффузионный барьер

Рисунок 3 - Предварительно изолированная труба с пятислойной трубой-оболочкой: [4]

– непрерывное производство включает одновременное формирование изоляции и экструзию защитного слоя с диффузионным барьером. Это сложный способ производства, применяемый небольшим количеством производителей ПИ-труб (например, LOGSTOR и ISOPLUS Companies). Метод ограничен номинальными диаметрами труб 20 –250 мм.

– полунепрерывное производство включает образование пены на стальной трубе, а затем - после удаления пресс-формы проводят намотку защитной оболочки или алюминиевой пленки в качестве диффузионного барьера (см. рисунок 3) на изоляцию. Они изготавливаются диаметром более 200 мм.

### 1.3 Вспениватели и свойства пенополиуретана

1.3.1 Пенополиуретаны относятся к термореактивным или термонеобратимым полимерам, которые получают путем вспенивания полиуретанов – продуктов поликонденсации ди- или полиизоцианатов (общая формула  $R-N=C=O$ , где R – углеводородный радикал) с двух- или трехатомными спиртами (полиолами).

1.3.2 Вспениватель (пенообразователь) – это вещество, которое само по себе или в комбинации с другим веществом, генерирует ячеистую структуру в полимере, образуя пеноматериал. Есть различные способы вспенивания полиуретана.

1.3.3 Вспенивание жидкой смеси полиола и изоцианата происходит за счет физико-химических процессов, в результате которых образуется газ. Когда жидкость пересыщается газом, начинают формироваться пузырьки, центрами которых являются диспергированный воздух или твердые частицы. Дополнительный газ диффундирует в растущие пузырьки. Согласно теории, равновесное давление в пузырьке обратно пропорционально его радиусу. Поэтому маленькие пузырьки соединяются с большими, образуя меньшее число больших ячеек.

Изначально сферические ячейки растут, соприкасаются друг с другом, и в конечном счете образуют деформированную, плотно упакованную структуру. Со временем полиуретановая пена постепенно становится все более вязкой и, в конечном счете, гелеобразной [5].

1.3.4 Свойства жестких полиуретановых пен, как и всех композиционных материалов, зависят от их состава и структуры. Они не являются изотропными и однофазными, все свойства определяются формой и ориентацией ячеек пены.

1.3.5 Вспениватели классифицируются на физические или химические. Химические вспениватели, находящиеся обычно в твердой фазе, представляют собой вещества, выделяющие в результате химических реакций газы, а физические вспениватели обычно подвергаются обратимому изменению физического состояния, например, испарению (см. табл. 2).

Таблица 2 – Типы пенообразователей [2]

Тип пенообразователя	Примеры
Сжатые газы, введенные в смесь химических веществ, находящихся под давлением, которые расширяются при сбросе давления	Газы, такие как азот или диоксид углерода, под высоким давлением поглощаются и мелкодисперсно распределяются в полимере, предназначенном для вспенивания, а затем расширяются, возвращаясь к нормальному атмосферному давлению
Жидкости, образующие ячейки при переходе в паровую фазу	Летучие жидкости, такие как пентан или фторированные соединения, поглощаются и мелкодисперсно распределяются в полимере, предназначенном для вспенивания, а затем расширяются при нагревании, образуя значительный объем пара
Химические вещества, которые разлагаются или реагируют под влиянием тепла с образованием газа	Химические пенообразователи, которые варьируются от простых солей, таких как бикарбонат аммония или натрия, до сложных соединений, высвобождающих азот

1.3.6 Традиционно хлорфторуглерод (ХФУ-11) был самым широко используемым пенообразователем для пенополиуретана. Однако, основные из ранее применявшихся пенообразователей - фреоны - способствуют истощению озонового слоя. В 1987 г. это послужило основанием к запрету производства хлорфторуглеродов. Тогда же был подписан международный договор, известный как Монреальский протокол по веществам, обедняющим озоновый слой [2].

1.3.7 Исследования по замене фреонов веществами с аналогичными технологическими характеристиками и парами с низкой теплопроводностью показали, что хлорфторуглерод, углекислый газ, галоген- углеводороды отвечали многим требованиям, но все-таки обладают более высоким потенциалом обеднения озонового слоя либо являются «тепличными» газами.

Юридические ограничения заставили европейских и американских производителей жестких пенопластов рассматривать другие альтернативные варианты. Большинство производителей жестких пенопластов, используемых в строительстве, сразу перешли на углеводородные пенообразователи, такие как пентан, циклопентан, изопентан, изобутан и их смеси, решив проблемы высокой горючести этих материалов и более высокой теплопроводности паров технологическими методами и переоборудованием производства [3].

1.3.8 С начала выполнения странами Монреальского протокола и последовавшего сокращения потребления ХФУ-11 было разработано много альтернативных вспенивателей. Первоначально замены включали циклопентан в Европе и гидрохлорфторуглерод (ГХФУ-141b) в США и странах Азии и Тихоокеанского региона [2].

1.3.9 По имеющейся информации [2], наиболее применяемые альтернативные технологии используют:

- системы, основанные на  $\text{CO}_2$  (вода);
- углеводороды (пентан и циклопентан);
- ГФУ-245fa;
- метилформиат.

1.3.10 За последнее десятилетие было исследовано большое количество альтернативных вспенивающих агентов в отношении их технологической пригодности, токсичности, воздействия на окружающую среду и экономическую целесообразность. Среди возможных заменителей R 11 и R 12 рассматривались гидрохлорфторуглероды, гидрофторуглероды, углекислый газ, пентан и некоторые углеводороды. Доказано, что изоляционные и другие характеристики ППУ, получаемых в случае использования фреонов R 141 и R 134a, а также изомеров пентана, по своим показателям равны или превосходят характеристики ППУ, в которых используется R 11.

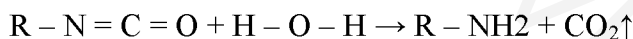
Примечание: По международному стандарту [15] техническое обозначение фреона (хладона) состоит из буквенного обозначения R (от слова refrigerant) и цифрового обозначения:

- первая цифра справа — это число атомов фтора (F) в соединении;
- вторая цифра справа — это число атомов водорода (H) в соединении плюс единица;
- третья цифра справа — это число атомов углерода (C) в соединении минус единица (для соединений метанового ряда нуль опускается);
- Число атомов хлора (Cl) в соединении находят вычитанием суммы чисел атомов фтора (F) и водорода (H) из общего числа атомов, которые могут соединяться с атомами углерода (C);
- для циклических производных в начале определяющего номера ставится буква C;
- В тех случаях, когда на месте части или всего хлора находится бром, применимы те же правила, кроме того, что буква B после обозначения исходного хлорофтористого соединения указывает на присутствие брома (Br).
- в случае, когда на месте хлора находится иод, в конце определяющего номера ставится буква I и цифра, показывающая число атомов иода в молекуле

1.3.11 В качестве переходного вспенивателя (разрешенного к применению до 2005 года) был предложен гидрохлорфторуглерод R 141b, являющийся невоспламеняемым, низкотоксичным веществом, хорошо смешивающимся с полиолом. Теплоизоляция, полученная при его использовании, равноценна теплоизоляции, которую обеспечивает использование фреонов.

1.3.12 Механизм пенообразователями на водной основе основан на процессе кипения низкомолекулярных растворителей (агентов) или определённых химических соединений в полимерной массе. Процесс кипения таких растворителей, как н-пентан и н-гексан, при температурах отверждения полимерных материалов сопровождается интенсивным процессом парообразования [6].

Изоцианат реагирует с водой и выделяется газ CO<sub>2</sub>:



1.3.13 Преимущества водного вспенивателя (CO<sub>2</sub>) [5]:

- цена;
- защита окружающей среды (GWP).

Недостатки водного вспенивателя (CO<sub>2</sub>):

- потеря в качестве: теплопроводность, механические свойства;
- хрупкость, снижение адгезии к основанию.

CO<sub>2</sub> в ячейках создаёт достаточно большое давление, повышая риск усадки.

Матрица пены должна иметь достаточную жёсткость для исключения эффекта усадки. Для обеспечения достаточной жёсткости матрицы минимально рекомендованная плотность должна быть 50 кг/м<sup>3</sup>.

1.3.14 Сравнительные характеристики полиуретанов, полученных при использовании различных вспенивателей, в том числе на основе пентанов, представлены в таблицах 3-5.

Таблица 3 - Сравнительная характеристика полиуретанов, полученных при использовании различных вспенивателей [6]

Показатели	Вспениватель			
	Фтортрихлорметан (CFC1 <sub>3</sub> ) R11	Хлорфторуглеводород (HCFC) R141b	Фторуглеводород (HFC) R134a	Циклопентан
Пожаро- и взрыво-безопасность	Нет	Да	Нет	Да
Состояние при нормальных условиях	Жидкость	Жидкость	Газ	Жидкость
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м К): – вспенивателя – ППУ на его основе	0,008 0,019–0,02	0,0095 0,021	0,013 0,025	0,01 0,02 – 0,022
Прочность при сжатии, кПа	130	140	—	150
Плотность готового изделия (в ядре), кг/м <sup>3</sup>	32	34	—	37
Плотность свободного вспенивания, кг/м <sup>3</sup>	20 – 22	20 – 22	—	22 – 24
Время старта пены Время гелеобразования Время окончания подъема пены	лабораторная проба, с	10 – 14 72 – 82 120 – 140	11 – 15 80 – 90 125 – 145	—
*компонент А – полиол Vorates (для всех исследуемых систем); компонент Б – SD 114/100 (вспениватель R 11), SD 211/100 (вспениватель R 141b), SD 172/100 (вспениватель циклопентан).				

Таблица 4 - Сравнительная характеристика полиуретанов, полученных при использовании различных вспенивателей [3]

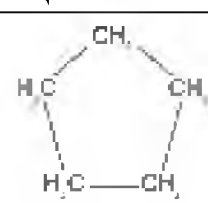
Показатель, ед. изм.	Соединение		
	Н-пентан	Изопентан	Циклопентан
Структурная формула	$  \begin{array}{cccccc}  & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\  &   &   &   &   &   \\  \text{H} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} - \text{H} \\  &   &   &   &   &   \\  & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H}  \end{array}  $	$  \begin{array}{ccccccc}  & & & \text{H} & & & \\  & & &   & & & \\  & \text{H} & \text{H} & - \text{C} & - \text{H} & \text{H} & \\  & & &   & & & \\  \text{H} & - \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} & - \text{H} \\  & & &   & & & \\  & & & \text{H} & \text{H} & - \text{C} & - \text{H} & \text{H} \\  & & & & & &   & \\  & & & & & & \text{H} & \\  \end{array}  $	
Температура кипения, °С	36	28	49,3
Теплопроводность паров, В/м·К	0,0151	-	0,012
Упругость пара при 20 °С, МПа	0,0508	-	0,045
Температура воспламенения, °С	285	427	361
Пределы взрываемости, %	1,5–7,8	-	1,1–8,7
Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны, мг/куб. м	300	300	50

Таблица 5 - Сравнительная характеристика вспенивателей полиуретанов по данным [5]

Тип вспенивателя	Температура кипения	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К (25 °С)	Основные преимущества	Основные недостатки
F11	24	0,0089	<ul style="list-style-type: none"> <li>– самая низкая теплопроводность;</li> <li>– негорючий;</li> <li>– хорошие показатели при старении</li> </ul>	Разрушает озоновый слой, выпуск будет прекращен
F141b	32	0,0107	<ul style="list-style-type: none"> <li>– низкая теплопроводность;</li> <li>– хорошая текучесть композиции</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– относительно низкая стабильность при температурах &gt;140 °С;</li> <li>– более высокая стоимость;</li> <li>– имеет потенциал деструкции озонового слоя;</li> <li>– в перспективе будет запрещен</li> </ul>
Пентаны: <i>n</i> -пентан изопентан циклопентан	36 28 50	0,0151 - 0,0120	<ul style="list-style-type: none"> <li>– озонобезопасные;</li> <li>– хорошая текучесть композиции</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– образуют взрывоопасные смеси с воздухом;</li> <li>– пожароопасные;</li> <li>– требуются высокие затраты на переоборудование</li> </ul>
CO <sub>2</sub>	-78	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>– озонобезопасный;</li> <li>– более высокая прочность на сжатие;</li> <li>– более высокая термостойкость;</li> <li>– не огнеопасен</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– повышение вязкости композиции, снижение текучести;</li> <li>– несколько более низкая адгезионная прочность;</li> <li>– высокая температура формы при производстве</li> </ul>

1.3.15 Теплопроводность ППУ на различных вспенивателях по данным [7] показана на рисунке 4.

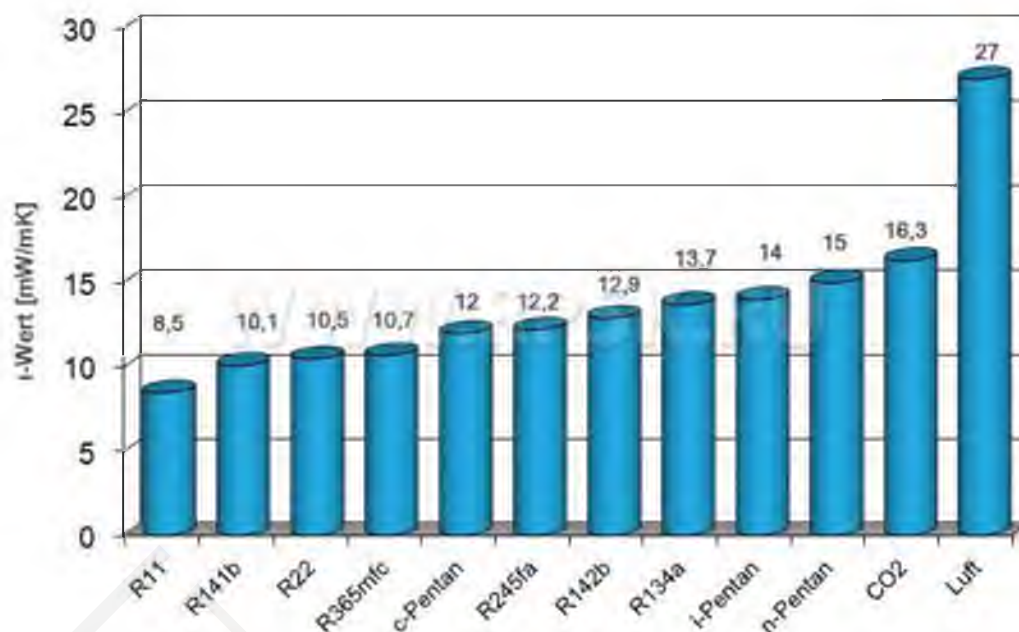


Рисунок 4 - Теплопроводность ППУ на различных вспенивателях

1.3.16 Цены на вспениватели ППУ по данным [2] представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Цены на вспениватели

Вещество	Цены на вспениватели, долл США/кг	
	Нижняя	Верхняя
ГХФУ-141b	2,50	3,80
4,4-дифенилметандиизоцианат (МДИ)	3,00	3,50
Пентан	1,90	2,50
Циклопентан	2,10	3,30
ГФУ-245fa	10,40	12,00
Метилформиат	2,20	3,20

1.3.17 Циклопентан среди других пенообразователей занимает устойчивую среднюю позицию, и является одним из наиболее применяемых в международной практике пенообразователей ППУ, в том числе при производстве ПИ-труб. При лучшем коэффициенте теплопроводности, примерно на 10% ниже, чем для остальных изомеров, другие физические, механические и технологические характеристики ППУ на циклопентане не уступают ППУ на вспенивателях типа R11 или R141b.

1.3.18 Циклопентан — это летучая жидкость, находящая широкое применение в качестве вспенивателя при получении жестких полиуретановых пенопластов. Он относится к озононеразрушающим вспенивателям.

1.3.19 Основные физические свойства циклопентана:

- внешний вид: бесцветная жидкость;
- химическая формула: C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>;

- молекулярная масса: 70,1 а.е.м.;
- температура плавления: 93,9 °С;
- температура кипения: 50 °С;
- растворимость (в г/100 г): вода — не растворим, этанол — растворим;
- плотность: 0,755 г/см<sup>3</sup> (при 20 °С).

1.3.20 Свойства циклопентана определяют особые меры предосторожности при его транспортировке. Необходимо избегать нагрева, т.к. это вещество легко переходит в газообразное состояние. Циклопентан горючий, что требует особых мер при транспортировке и переработке.

1.3.21 Переход на циклопентан обусловлен его экологичностью, хотя по сравнению со своими предшественниками, он менее технологичен и имеет:

- более высокую стоимость,
- более высокую температуру кипения;
- прочность при 10%-м сжатии ниже при аналогичной плотности.

1.3.22 Снижение прочностных характеристик приводит к необходимости повышать плотность изделий, то есть увеличивать расход материалов.

Переход на циклопентан в качестве вспенивателя требует технического переоснащения предприятия и пересмотра технологических циклов, в том числе замены соприкасающихся с ППУ материалов, т. к. циклопентан более агрессивный.

1.3.23 Сравнительные характеристики и воздействие на окружающую среду фреона R-11 и циклопентана по данным [6] представлены в таблице 7.

Таблица 7 - Сравнительные характеристики и воздействие на окружающую среду вспенивателей ППУ

Показатель, ед. измерения	Вспениватель	
	R-11	Циклопентан
Температура кипения °С	24	50
Потенциал деструкции озона (ODP)	1	0
Потенциал всемирного потепления (HGWP)	1	0
Теплопроводность газовой фазы, мВт/м·К, при 10 °С	7,4	11,5
Стоимость, €/кг	2,45	2,9

1.3.24 Наиболее существенным недостатком циклопентана является его взрыво- и пожароопасность при концентрациях уже от 1,4 до 8,0 объемных % [6]. Поэтому использование циклопентана требует организации противопожарных мероприятий.

1.3.25 По данным [5], адаптация производства для выпуска ППУ на циклопентановом вспенивателе, как правило, включает определенный комплекс организационных и методических решений. К ним относятся:

- оборудование производства специальными пенозаливочными машинами;



- организация безопасного хранения циклопентана и перемешивания его с полиолом;
- монтаж линий подачи подготовленного полиола к заливочной машине;
- предотвращение появления взрывоопасных воздушных смесей циклопентана;
- локализация зон возможного выделения циклопентана и оборудование их газоанализаторами, системами вентиляции и пожаротушения;
- замена электрооборудования на взрывобезопасное;
- обучение персонала.

Переоборудование производства приводит к соответствующему удорожанию продукции.

## 2 Изменение теплопроводности пенополиуретана ПИ-труб при его старении

2.1 ППУ состоит из закрытых ячеек, которые содержат пары инертных пенообразователей. Теплопередача через конкретный пенополиуретан происходит с помощью радиации, конвекции внутри ячеек и проводимости через полимер стенок ячеек, а также за счет проводимости пара. Радиационный компонент при этом составляет примерно одну четверть от значения общей теплопередачи [5].

2.2 Теплопроводность ППУ зависит не только состава газа, но также от плотности пены и ее структуры. Ячейки ППУ содержат, кроме вспенивателя, небольшое количество воздуха и  $\text{CO}_2$ . Содержание пара в ячейках пены стремится к равновесию с окружающей средой за счет диффузии воздуха внутрь, а пенообразователя — наружу из ячеек.

2.3 При старении ППУ, вспененных  $\text{CO}_2$  и фреонами, коэффициент теплопроводности имеет тенденцию к некоторому увеличению до тех пор, пока парциальное давление газов в пене не станет равным парциальному давлению паров в атмосфере. После этого устанавливается равновесное значение коэффициента теплопроводности. О величине проницаемости через пленки ППУ и его теплопроводности можно судить по данным [9], см. таблицу 8.

Таблица 8 - Проницаемость и коэффициент теплопроводности ППУ по данным [9]

Газ	Проницаемость при стандартных температуре и давлении, $\text{см}^3/\text{с}\cdot\text{см}^2\cdot\text{мм рт.ст}$	Коэффициент теплопроводности ППУ <sup>1)</sup> , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$
Азот	0,27	241
Воздух	0,43	241
Кислород	1,07	244
Двуокись углерода	4,0	147
Водяной пар	1100	172
Трихлорфторметан (F-11)	0,0299	98

<sup>1)</sup> коэффициент теплопроводности ППУ определен при  $0^\circ\text{C}$

2.4 Наиболее значимыми факторами, влияющими на процесс изменения коэффициента теплопроводности ППУ, в [9] считают наличие оболочки и кажущуюся плотность пены. Например, в [9] приводят данные о том, что вследствие анизотропии ячеек и ориентации стенок (пленок) формованного пенопласта теплопередача в направлении, перпендикулярном подъему пены, приблизительно на 20 % меньше, чем в направлении подъема. Меньшее влияние, чем наличие внешней оболочки, на изменение коэффициента теплопроводности при старении оказывает кажущаяся плотность пены. При условии, что ячеистая структура

оставалась без изменений, значения коэффициента теплопроводности по мере увеличения кажущейся плотности пены от 29 до 37 кг/м<sup>3</sup> возрастали очень медленно.

2. 5 Судя по данным изменения коэффициента теплопроводности ПУ на циклопентане [4], к перечисленным факторам необходимо добавить пенообразователь, так как от этого зависит размер диффундирующих молекул газа, заполняющих ячеистую структуру полиуретана.

2. 6 Результаты наиболее полных исследований деградации теплоизоляционных свойств ППУ на водной основе (СО<sub>2</sub>) и на циклопентане представлены в [4].

2. 7 Основными факторами, приводящими к старению ППУ изолированной трубы и снижению ее теплозащитных свойств, являются:

- температура стальной трубы (теплоносителя);
- влажность пены;
- процесс диффузии газов из ячеек ПУ;
- деформация труб под нагрузкой, снижение прочности на сжатие в радиальном направлении;
- уменьшение осевого давления, из-за чего уменьшается ее адгезия изоляции к трубам, и, следовательно, механическая целостность предварительно изолированной системы.

2. 8 Диффузия газов, приводящая к старению изоляции трубы, состоит в протекании следующих процессов. Атмосферные газы - кислород и азот проникают в пену ППУ и заменяют клеточный газ - циклопентан и диоксид углерода (СО<sub>2</sub>), что вызывает ухудшение изоляции, то есть увеличение теплопроводности пены. Диффузия вызвана разным парциальным давлением газов (вспенивателями, используемых для производства вспененных материалов с закрытыми ячейками), возникающих при производстве изоляции.

Скорость диффузии газов в предварительно изолированных трубах зависит от:

- типа вспенивающего агента (размер молекул газа, содержащихся в закрытых изоляционных ячейках). Молекулы СО<sub>2</sub> относительно малы, поэтому их диффузия будет намного интенсивнее, чем диффузия циклопентанового газа гораздо больших молекул;
- температура теплоносителя (чем выше температура, тем быстрее происходит диффузионный процесс);
- толщина теплоизоляционного слоя и трубы-оболочки - чем тоньше слой, тем быстрее будет протекать процесс диффузии. Это означает, что изоляция труб малых диаметров будет иметь худшие теплоизоляционные свойства, чем изоляция от труб больших диаметров труб (толщина слоев увеличивается с увеличением номинального диаметра);
- метод производства.

2. 9 В публикации [4] представлены результаты испытаний теплопроводности ППУ для предварительно состаренных труб в естественных и искусственных средах. На рисунке 5 представлены результаты испытаний коэффициента теплопроводности искусственно состаренных ППУ труб в зависимости от типа вспенивателя.

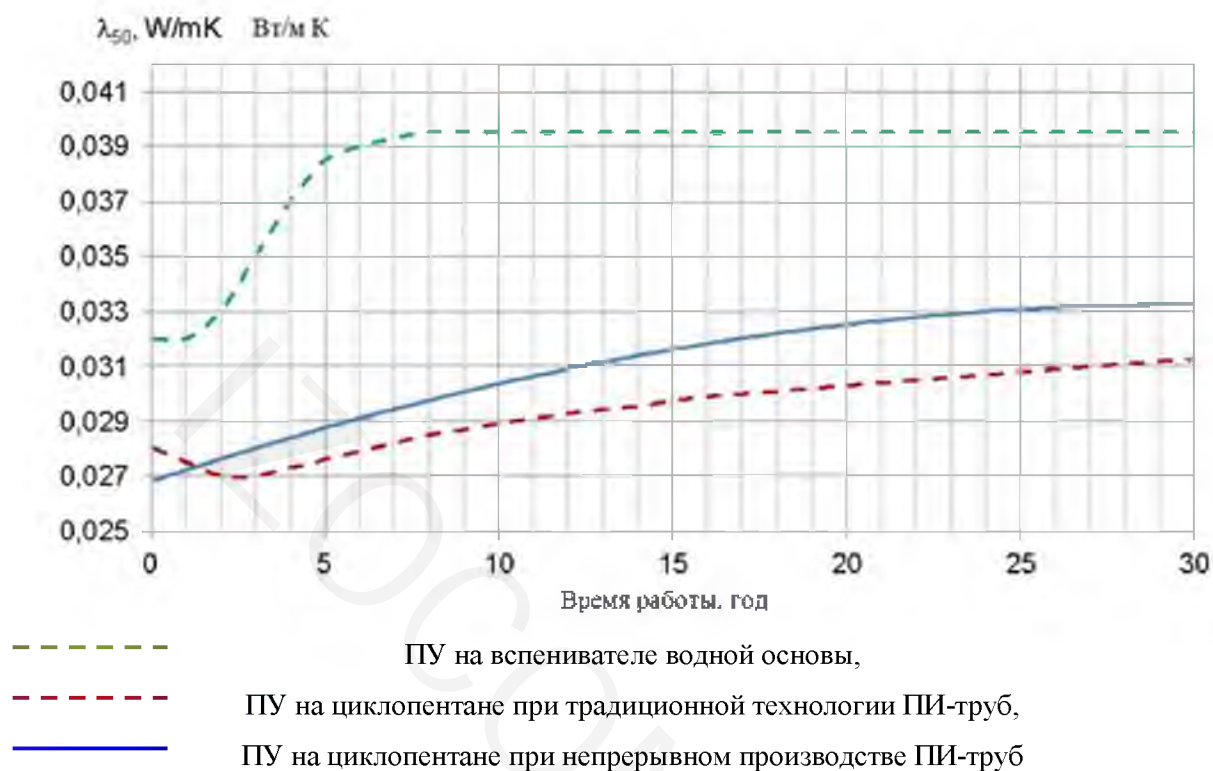


Рисунок 5 - Результаты испытаний коэффициента теплопроводности ППУ [4]

2. 10 Как видно из рисунка 5, коэффициенты теплопроводности всех вариантов ПИ-труб возрастают с разной скоростью, что свидетельствует о влиянии пенообразователя и технологии изготовления труб. В случае традиционной технологии изготовления ПИ-труб на водном вспенивателе (CO<sub>2</sub>) в течение первых 5 лет, коэффициент теплопроводности резко возрастает, и примерно через 6 лет достигает предельного значения  $\lambda_{50} = 0,0395$  Вт/ м К. В случае ПИ-труб на циклопентане существует разница между трубами, изготовленными традиционным способом, и трубами, производимыми непрерывным методом. Для труб с циклопентаном, полученных традиционным способом, исходное значение коэффициента теплопроводности ППУ составляет  $\lambda_{50} = 0,028$  Вт/м К. Через 2 года показатель уменьшается до  $\lambda_{50} = 0,027$  Вт/м К, а через 30 лет он увеличивается до значения  $\lambda_{50} = 0,0312$  Вт/м К (13,4%).

2. 11 По материалам [4] данные по изменению коэффициента теплопроводности сведены в таблицу 9.

Таблица 9 – Изменение коэффициента теплопроводности ПИ-труб

Вариант		Коэффициенты теплопроводности, Вт/м·К		
вспенивателя	технологии	исходное значение	в процессе эксплуатации	в течение периода, лет
СО <sub>2</sub> (водная основа)	традиционная	0,032	0,0395	6
циклопентан	традиционная	0,028	0,027	2
			0,0312	30
циклопентан	непрерывная	0,027	0,033	25

2. 12 Результаты испытаний коэффициента теплопроводности ППУ после естественного старения по [4] представлены на рисунке 6.

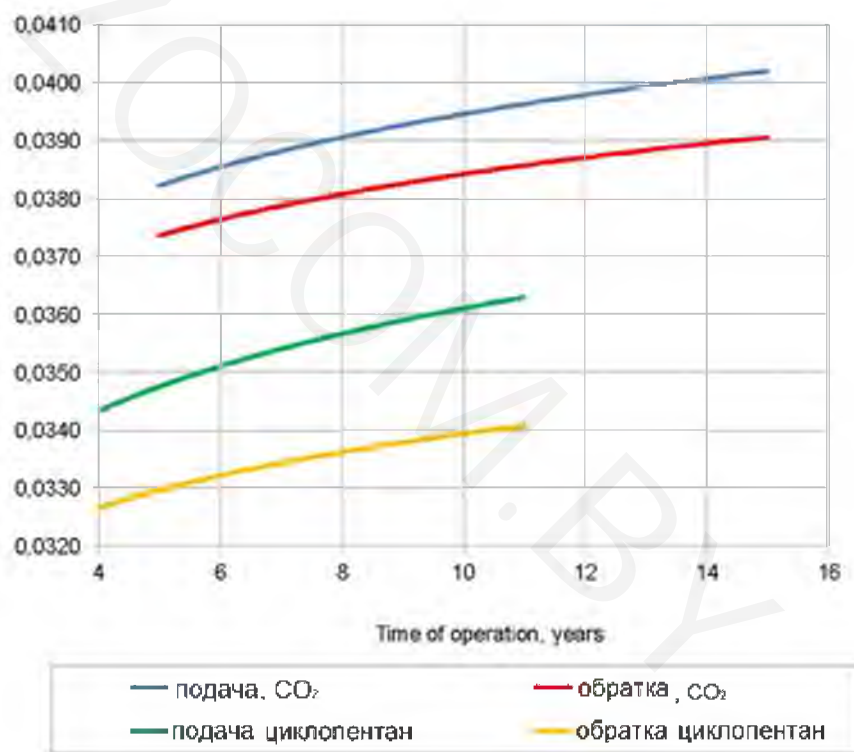


Рисунок 6 - Коэффициент теплопроводности полиуретана  $\lambda_{50}$ , Вт / м К, на водной основе и циклопентане после естественного старения

2. 13 Как видно из рисунка 6, коэффициент теплопроводности полиуретана увеличивается для изоляции на водной основе (СО<sub>2</sub>):

- после первых 5 лет работы на 19% (подача) и 17% (обратка);
- от 6 до 15 лет, от 0,4% до 1% в год.

Для полиуретана, вспененного циклопентаном:

- после первых 4 лет работы на 23% (подача) и 17% (обратка);
- от 5 до 11 лет на 1% в год.

Методом экстраполяции в [4] были определены значения теплопроводности в периоды эксплуатации до 30 лет, полученные для условий при естественного старения, см. рисунок 7.

2. 14 В качестве начальных значений коэффициент теплопроводности новой изоляции ППУ предполагалось следующее:

- в случае циклопентана  $\lambda_{50} = 0,028$  Вт/м К (среднее количество испытаний, проведенных в лаборатории) и  $\lambda_{50} = 0,029$  Вт/м К;
- в случае  $\text{CO}_2$   $\lambda_{50} = 0,032$  Вт/м К (среднее из испытаний, проведенных в лаборатории) и  $\lambda_{50} = 0,033$  Вт/м К.

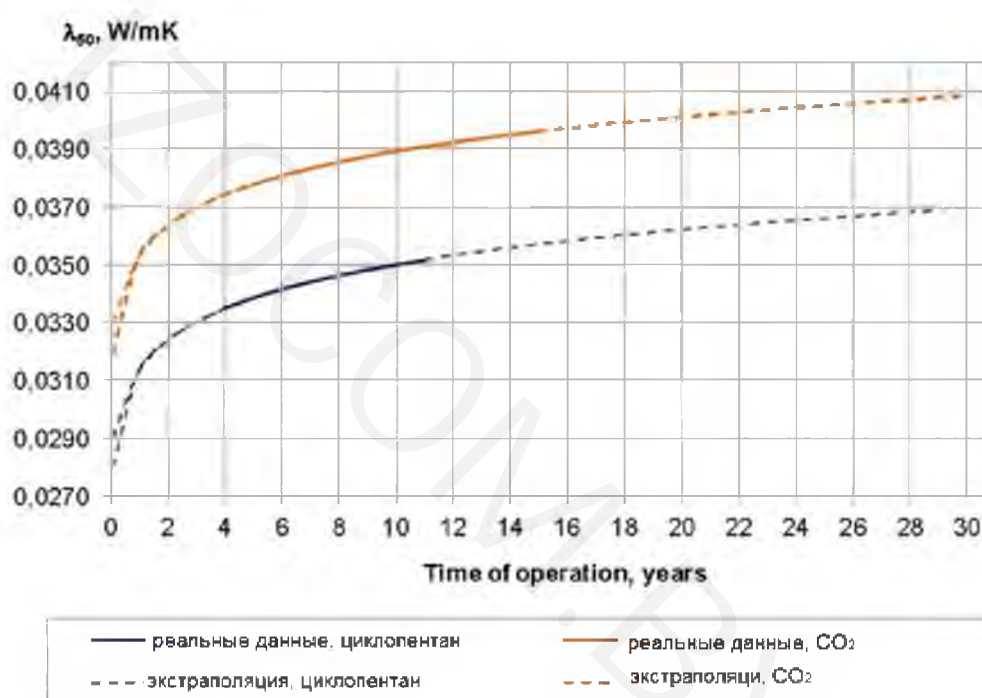


Рисунок 7 - Изменение коэффициента теплопроводности  $\lambda_{50}$ , Вт/м К (среднее значение – подача + обратка) изоляции пенополиуретана, вспененного с  $\text{CO}_2$  и циклопентаном [4] при естественном старении

2. 15 По результатам испытаний коэффициента теплопроводности изоляции трубы после искусственного старения по EN 253 по данным [4] получено, что при среднем значении 11-ти образцов труб номинальным диаметром 50 мм перед старением 0,0281 Вт/м·К значение  $\lambda_{50}$ , Вт/м·К, после старения составило 0,0297 Вт/м·К. Итоговые результаты исследования [4] представлены на рисунках 8 - 10.

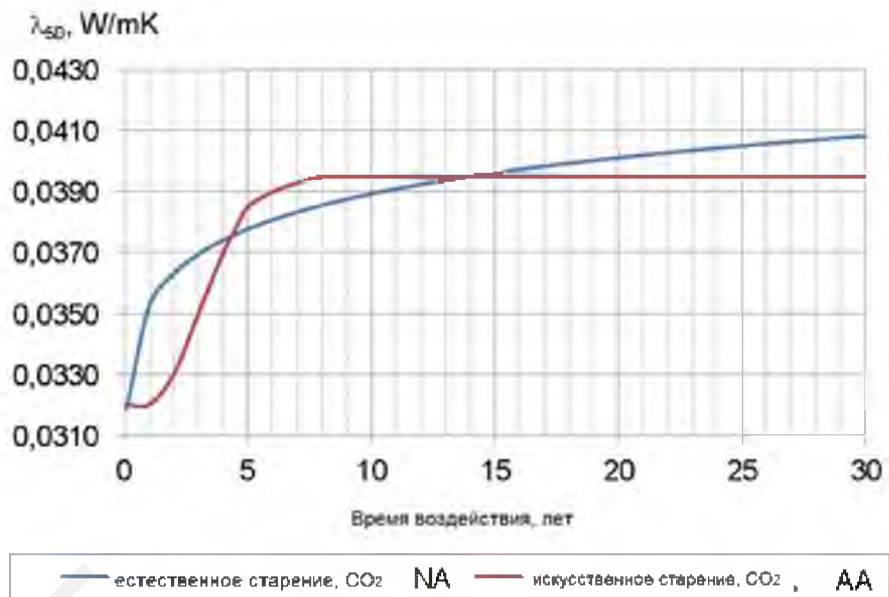


Рисунок 8 - Коэффициент теплопроводности изоляции, вспененной с  $\text{CO}_2$  после искусственного (AA) и естественного старения (NA)



Рисунок 9 - Коэффициент теплопроводности изоляции, вспененной циклопентаном после искусственного (AA) и естественного старения (NA)

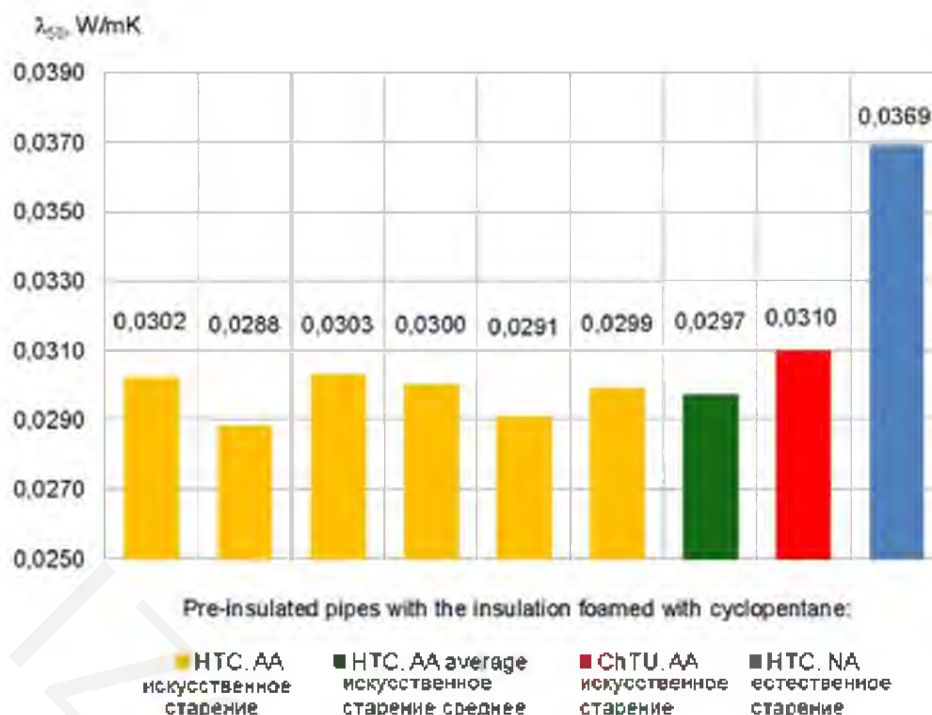


Рисунок 10 - Ожидаемые коэффициенты теплопроводности изоляций, вспениваемых циклопентаном после искусственного (AA) и естественного старения (NA) после 30 лет эксплуатации [4]

2.16 Как видно из рисунков 8-10, коэффициент теплопроводности изоляции, вспененной циклопентаном после искусственного старения и после естественного старения после 30 лет эксплуатации, весьма различается. Эта разница возможно, обусловлена несоответствующими естественным условиям стандартизированных параметров искусственного старения [4].

2.17 Таким образом, результаты испытаний коэффициента теплопроводности изоляции предварительно изолированных труб в естественных условиях подтверждают, что в период эксплуатации теплоизоляционные свойства пенополиуретана ПИ-труб теплоснабжения во времени ухудшаются.

2.18 Результаты испытаний коэффициента теплопроводности изоляции на водной основе в естественных условиях схожи с ожидаемыми изменениями этого коэффициента после искусственного старения. Значения коэффициента теплопроводности изоляции на циклопентане не совпадают с ожидаемыми изменениями в этот коэффициент после искусственного старения, что является предметом будущих исследований.

2.19 Для расчета снижения теплового потока ПИ-труб с изоляцией на водной основе и циклопентане приняты данные [4] для условий естественного старения труб. Значения повышения коэффициента теплопроводности приняты по графикам рисунков 8 и 9 для каждого года эксплуатации и представлены в таблице 10.



Таблица 10 – Принятые значения коэффициента теплопроводности для расчета удельного теплового потока ПИ-труб

Год эксплуатации	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С <sup>1</sup>		Год эксплуатации	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С <sup>1</sup>	
	ППУ на водной основе (СО <sub>2</sub> )	ППУ на циклопентане		ППУ на водной основе (СО <sub>2</sub> )	ППУ на циклопентане
1	0,034	0,030	16	0,040	0,036
2	0,036	0,032	17	0,040	0,036
3	0,037	0,033	18	0,040	0,036
4	0,037	0,033	19	0,040	0,036
5	0,037	0,034	20	0,040	0,036
6	0,038	0,034	21	0,040	0,036
7	0,038	0,034	22	0,040	0,036
8	0,038	0,035	23	0,040	0,036
9	0,039	0,035	24	0,040	0,036
10	0,039	0,035	25	0,040	0,037
11	0,039	0,035	26	0,041	0,037
12	0,039	0,035	27	0,041	0,037
13	0,039	0,035	28	0,041	0,037
14	0,039	0,035	29	0,041	0,037
15	0,039	0,036	30	0,041	0,037

<sup>1</sup> значения коэффициента теплопроводности соответствуют среднему значению за предыдущий год эксплуатации (или исходное значение) и значению текущего года, принятого по [4]

### 3 Методика и результаты расчета плотности теплового потока ПИ-труб с ППУ на водной основе (CO<sub>2</sub>) и циклопентане

#### 3.1 Методика расчета

3.1.1 В условиях поставленной задачи – определения эффекта экономии тепловой энергии за счет применения ППУ на циклопентане при учете снижения теплоизоляционных свойств ППУ - методика расчета сводилась к этапам, представленным на схеме рисунка 11.

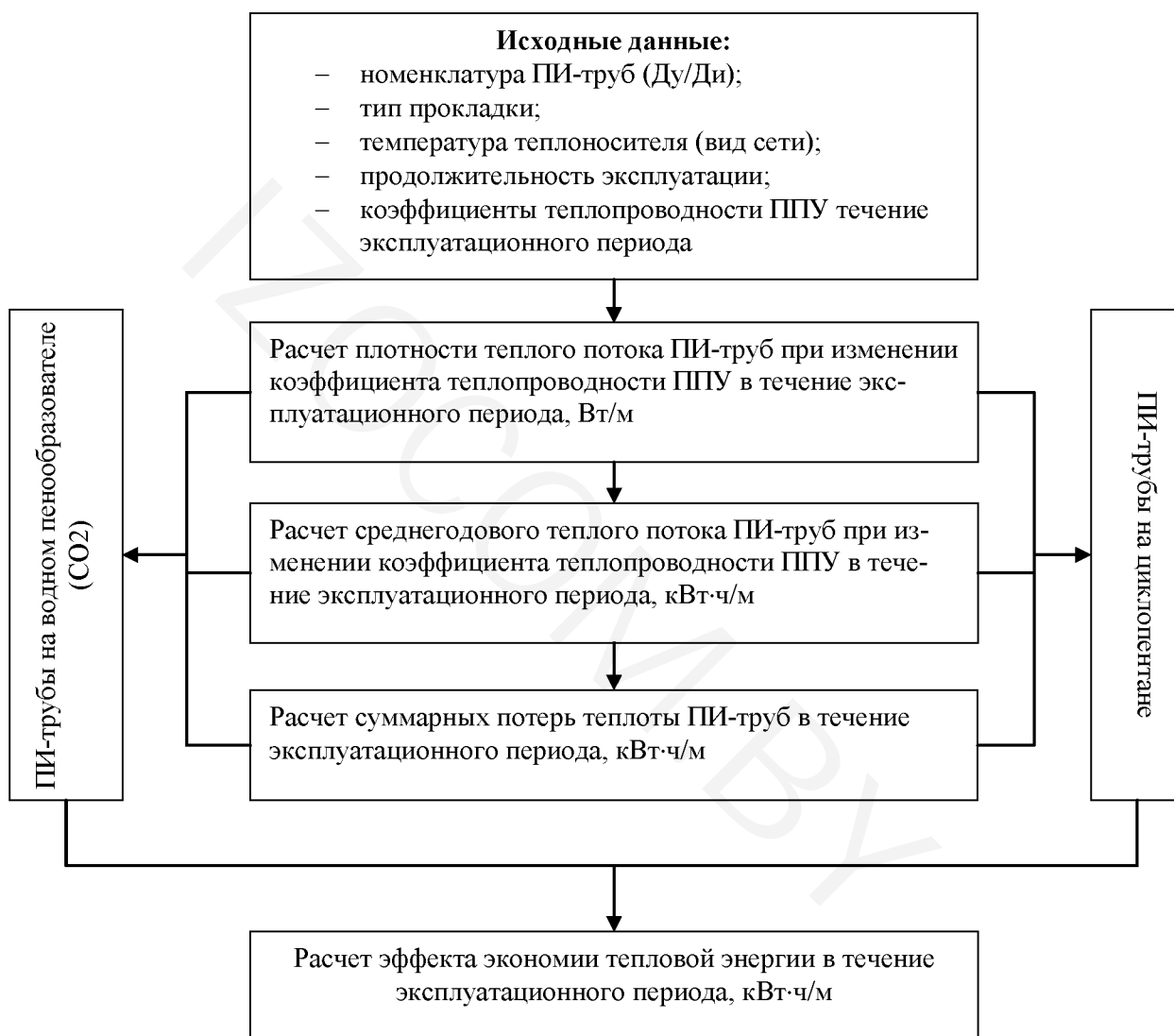


Рисунок 11 – Схема расчета эффекта экономии тепловой энергии за счет замены пенообразователя ПИ-труб

3.1.2 Определение плотности теплового потока ПИ-труб по номенклатуре [1] в диапазоне диаметров 23-1000 мм производили по методикам [11].

3.1.3 При определении среднегодовой величины теплового потока ПИ-труб предполагалось, что:

– ПИ-трубы сетей отопления функционируют 4800 часов в год (среднее значение для Республики Беларусь);

– ПИ-трубы сетей ГВС функционируют 8424 часов в год с учетом 2-х недельного перерыва на текущий ремонт и опрессовку.

3.1.4 Расчет суммарных потерь теплоты ПИ-труб в течение эксплуатационного периода производился с использованием значений меняющихся коэффициентов теплопроводности для ППУ на водной (CO<sub>2</sub>) основе и циклопентане.

3.1.5 Расчет эффекта экономии тепловой энергии в течение эксплуатационного периода определен как разница суммарных потерь теплоты ПИ-труб в течение эксплуатационного периода для ППУ на водной (CO<sub>2</sub>) основе и циклопентане. При определении эффекта экономии потерь теплоты остальные параметры (диаметры, теплотехнические характеристики оболочек) принимались одинаковыми.

### 3.2 Исходные данные

3.2.1 В качестве исходных данных принята номенклатура (диаметры) и технические характеристики ПИ-труб производства ООО «Изоком Пласт» в соответствии с [1].

3.2.2 Расчеты выполнены для условий подземной бесканальной прокладки ПИ-труб системы отопления и горячего водоснабжения.

3.2.3 Расчетные параметры приняты в соответствии с [11] и [12] для двухтрубной подземной бесканальной прокладки сетей теплоснабжения (ТС) и систем горячего хозяйственно-питьевого водоснабжения (ГВС).

3.2.4 Значения расчетных коэффициентов теплопроводности материалов труб и грунта приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Расчетные коэффициенты теплопроводности материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности по условиям эксплуатации Б, Вт/(м·°С)	Источник
Стальные трубы	58	[10]
Пенополиуретан	0,028 – 0,041	По табл. 10
Полиэтилен	0,42	Принято для ПЭВП (НД) по табл. 3.2 [13]
Грунт сильновлажный	2,3	[12]

3.2.5 Расчетные параметры приведены в таблицах 12 и 13.

Таблица 12 – Расчетные параметры для системы теплоснабжения

Параметр:	Значение:
Температурный график водяных тепловых сетей:	95/70 °С
Расчетная температура воды для подающего трубопровода:	65 °С
Расчетная температура воды для обратного трубопровода :	50 °С
Условия прокладки:	г. Минск
Заглубление верха перекрытия канала или верха оболочки трубопровода:	более 0,7 м
Расчетная температура окружающей среды:	7,9 °С (средняя за год температура грунта на глубине заложения оси трубопровода) <sup>1)</sup>
Расстояние между оболочками ПИ-труб (по рекомендациям производителей) для трубопроводов диаметром: - до 225 мм: - до 780 мм: - более 780 мм:	- 150 мм; - 250 мм; - 350 мм.
Режим работы:	отопительный период
<sup>1)</sup> По причине отсутствия данных о средней за год температуре грунта на глубине заложения оси трубопровода 0,7 м по городу Минску, для расчета принята средняя год температура грунта на глубине заложения оси трубопровода 1,6 м по Минской области. При отсутствии других данных значение принято по [14].	

Таблица 13 – Расчетные параметры для системы горячего водоснабжения

Параметр:	Значение:
Температурный график водяных тепловых сетей:	95/70 °С
Расчетная температура воды для подающего трубопровода:	75 °С
Расчетная температура воды для обратного трубопровода :	40 °С
Условия прокладки:	г. Минск
Заглубление верха перекрытия канала или верха оболочки трубопровода:	более 0,7 м
Расчетная температура окружающей среды:	7,9 °С (средняя за год температура грунта на глубине заложения оси трубопровода) <sup>1)</sup>
Расстояние между оболочками ПИ-труб (по рекомендациям производителей) для трубопроводов диаметром: - до 225 мм: - до 780 мм: - более 780 мм:	- 150 мм; - 250 мм; - 350 мм.
Режим работы:	круглогодичный
<sup>1)</sup> По причине отсутствия данных о средней за год температуре грунта на глубине заложения оси трубопровода 0,7 м по городу Минску, для расчета принята средняя год температура грунта на глубине заложения оси трубопровода 1,6 м по Минской области. При отсутствии других данных значение принято по [14].	

3.2. 6 При отсутствии данных значения температуры грунта на глубине заложения трубопровода приняты с использованием справочных данных [14].

3.2. 7 Расчеты плотности теплового потока выполнялись в соответствии с методами [11] и [12] для двухтрубной подземной бесканальной прокладки систем ТС и ГВС.

#### 4 Результаты расчета

4.1 Результаты расчетов приведены в таблицах 14. Значения, указанные в таблицах 14-15, соответствуют суммарным значениям плотности теплового потока по подающему и обратному трубопроводу систем отопления и ГВС.

Таблица 14 – Суммарная плотность теплового потока системы тепловых сетей при использовании в качестве вспенивателей на водной основе (углекислого газа) и циклопентана с учетом старения

Типоразмер	Углекислый газ				Циклопентан			
	ввод в эксплуатацию	через 5	через 15	через 30	ввод в эксплуатацию	через 5	через 15	через 30
	Коэффициент теплопроводности ППУ $\lambda_{ППУ}$ , Вт/м·°С							
	0,033	0,0375	0,0395	0,041	0,028	0,034	0,0358	0,037
32/90	19,3	21,7	22,8	23,6	16,6	19,9	20,8	21,5
33,5/90	20,2	22,7	23,8	24,6	17,3	20,8	21,8	22,4
38/110	18,8	21,2	22,2	23,0	16,1	19,3	20,3	20,9
42,3/110	20,9	23,5	24,6	25,4	17,9	21,4	22,5	23,2
45/110	22,3	25,0	26,2	27,1	19,1	22,9	24,0	24,7
48/110	23,9	26,9	28,2	29,1	20,6	24,6	25,8	26,5
57/125	25,1	28,2	29,6	30,6	21,6	25,8	27,1	27,9
75,5/140	31,9	35,7	37,3	38,5	27,5	32,7	34,2	35,2
76/140	32,2	36,0	37,7	38,9	27,8	33,0	34,6	35,6
88,5/160	33,0	37,0	38,7	39,9	28,5	33,9	35,5	36,5
89/160	33,3	37,3	39,0	40,3	28,8	34,2	35,8	36,9
108/200	31,7	35,6	37,3	38,5	27,3	32,6	34,1	35,2
114/200	34,6	38,8	40,6	41,9	29,9	35,6	37,2	38,3
133/225	37,0	41,4	43,3	44,7	31,9	38,0	39,7	40,9
159/250	43,0	48,1	50,3	51,9	37,2	44,2	46,2	47,5
219/315	53,4	59,6	62,2	64,2	46,3	54,8	57,3	58,9
273/400	51,5	57,6	60,2	62,1	44,5	52,9	55,3	56,9
325/450	60,3	67,2	70,2	72,4	52,2	61,8	64,6	66,5
377/500	69,4	77,2	80,6	83,1	60,3	71,2	74,3	76,4
426/560	72,0	80,2	83,7	86,3	62,6	73,9	77,1	79,3
530/710	68,3	76,3	79,7	82,2	59,2	70,1	73,3	75,4
630/800	83,7	93,1	97,2	100,2	72,8	85,8	89,6	92,1
720/900	89,6	99,7	104,1	107,3	77,9	91,9	95,9	98,6
820/1000	101,0	112,2	117,0	120,6	88,0	103,6	108,0	111,0
920/1100	112,3	124,5	129,7	133,6	97,9	115,0	119,9	123,2
1020/1200	123,9	137,2	142,9	147,0	108,3	126,9	132,2	135,7

Таблица 15 – Удельные потери теплоты системой горячего водоснабжения при использовании в качестве вспенивателей на водной основе (углекислого газа) и циклопентана с учетом старения

Типоразмер	Углекислый газ				Циклопентан			
	ввод в эксплуатацию	через 5	через 15	через 30	ввод в эксплуатацию	через 5	через 15	через 30
	$\lambda_{ППУ}, \text{Вт/м}\cdot\text{°C}$							
	0,033	0,0375	0,0395	0,041	0,028	0,034	0,0358	0,037
32/90	21,3	23,9	25,1	25,9	18,3	21,9	22,9	23,6
33,5/90	22,2	25,0	26,2	27,1	19,1	22,8	23,9	24,7
38/110	20,7	23,3	24,5	25,3	17,8	21,3	22,3	23,0
42,3/110	23,0	25,8	27,1	28,0	19,7	23,6	24,8	25,5
45/110	24,5	27,5	28,9	29,8	21,1	25,2	26,4	27,2
48/110	26,3	29,6	31,0	32,0	22,7	27,1	28,4	29,2
57/125	27,7	31,1	32,5	33,6	23,8	28,4	29,8	30,7
75,5/140	35,1	39,2	41,1	42,4	30,3	36,0	37,7	38,8
76/140	35,4	39,6	41,5	42,8	30,6	36,4	38,1	39,2
88,5/160	36,3	40,7	42,6	44,0	31,4	37,3	39,1	40,2
89/160	36,7	41,0	42,9	44,4	31,7	37,7	39,4	40,6
108/200	34,9	39,2	41,0	42,4	30,1	35,9	37,6	38,7
114/200	38,1	42,7	44,7	46,1	32,9	39,1	41,0	42,2
133/225	40,7	45,6	47,7	49,2	35,1	41,8	43,7	45,0
159/250	47,4	53,0	55,4	57,2	40,9	48,6	50,9	52,3
219/315	58,8	65,6	68,5	70,7	50,9	60,3	63,0	64,8
273/400	56,7	63,4	66,2	68,4	49,0	58,2	60,9	62,6
325/450	66,4	74,0	77,3	79,8	57,5	68,1	71,1	73,2
377/500	76,4	85,0	88,7	91,5	66,4	78,3	81,8	84,1
426/560	79,3	88,3	92,1	95,0	68,9	81,3	84,9	87,3
530/710	75,2	84,0	87,7	90,5	65,2	77,2	80,7	83,0
630/800	92,2	102,5	107,0	110,3	80,1	94,5	98,7	101,4
720/900	98,6	109,7	114,5	118,1	85,7	101,1	105,6	108,5
820/1000	111,2	123,5	128,8	132,7	96,8	114,0	118,9	122,2
920/1100	123,6	137,0	142,8	147,1	107,8	126,6	132,0	135,6
1020/1200	136,4	151,0	157,3	161,9	119,2	139,7	145,6	149,4

4. 2 Итоговый эффект экономии тепловой энергии 1 м ПИ-трубы за 30 лет эксплуатации от применения в ППУ циклопентана в качестве вспенивателя изоляции труб приведен в таблице 16. Эффект представлен в виде разницы суммарных потерь теплоты 1 м ПИ-трубы для указанных вариантов.

Таблица 16 - Итоговый эффект экономии тепловой энергии 1 м ПИ-трубы за 30 лет эксплуатации от применения в ППУ циклопентана в качестве вспенивателя изоляции труб

Типоразмер	Потери теплоты за 30 лет эксплуатации, МВт·час, экономия, %					
	Тепловые сети			ГВС		
	Пенообразователь		экономия	Пенообразователь		экономия, %
	углекислый газ	циклопентан		углекислый газ	циклопентан	
32/90	3,22	2,9	9,10%	6,28	5,71	9,10%
33,5/90	3,36	3,1	9,06%	6,55	5,96	9,06%
38/110	3,14	2,8	9,16%	6,12	5,56	9,16%
42,3/110	3,47	3,2	9,08%	6,78	6,16	9,08%
45/110	3,70	3,4	9,02%	7,22	6,57	9,02%
48/110	3,97	3,6	8,96%	7,76	7,06	8,96%
57/125	4,17	3,8	8,95%	8,14	7,42	8,95%
75,5/140	5,27	4,8	8,73%	10,28	9,38	8,73%
76/140	5,32	4,9	8,72%	10,38	9,48	8,72%
88,5/160	5,46	5,0	8,73%	10,66	9,73	8,73%
89/160	5,51	5,0	8,72%	10,75	9,81	8,72%
108/200	5,26	4,8	8,85%	10,27	9,36	8,85%
114/200	5,73	5,2	8,76%	11,18	10,20	8,76%
133/225	6,11	5,6	8,72%	11,93	10,89	8,72%
159/250	7,11	6,5	8,64%	13,87	12,67	8,64%
219/315	8,79	8,0	8,45%	17,15	15,70	8,45%
273/400	8,50	7,8	8,60%	16,59	15,16	8,60%
325/450	9,92	9,1	8,44%	19,36	17,72	8,44%
377/500	11,39	10,4	8,29%	22,23	20,38	8,29%
426/560	11,82	10,8	8,29%	23,07	21,16	8,29%
530/710	11,26	10,3	8,50%	21,97	20,10	8,50%
630/800	13,73	12,6	8,26%	26,80	24,59	8,26%
720/900	14,70	13,5	8,27%	28,69	26,31	8,27%
820/1000	16,54	15,2	8,14%	32,27	29,64	8,14%
920/1100	18,34	16,9	8,01%	35,78	32,91	8,01%
1020/1200	20,19	18,6	7,89%	39,40	36,30	7,89%

4.3 Как видно из таблицы 16, процент экономии тепловой энергии от замены вспенивателя ППУ составляет 8-9 % от ППУ на водной основе (CO<sub>2</sub>) и не зависит от температуры теплоносителя. Большая экономия тепловой энергии получена на трубопроводах меньшего диаметра. Это обусловлено большим отношением площади утепляемой трубы к толщине теплоизоляции.

4.4 Полученные значения экономии тепловой энергии будут использованы в качестве входных параметров для технико-экономического обоснования перехода к технологии с использованием циклопентана.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 В соответствии с техническим заданием выполнен анализ результатов исследования зарубежного опыта применения предварительно изолированных труб и фасонных изделий, произведенных с использованием в качестве вспенивателя циклопентана, их преимущества. Установлено, что основной причиной замены вспенивателей ППУ предизолированных труб стал Монреальский протокол (1989 г.) по веществам, разрушающим озоновый слой. Другими причинами, мотивирующими к применению озонобезопасных пенообразователей, является стабильность теплозащитных свойств труб в период их эксплуатации.

2 Циклопентан относится к одному из наиболее применяемых пенообразователей в технологии ППУ ПИ-труб после перехода к выполнению Монреальского соглашения. Обладая неоспоримыми преимуществами по теплоизоляционным показателям изделий, он требует переналадки производства, так как относится к пожаро- взрывоопасным веществам.

3 Для учета фактора старения ППУ труб в период эксплуатации в отчете рассмотрены материалы польского исследовательского центра по изучению коэффициента теплопроводности ПИ-труб на ППУ на водной ( $\text{CO}_2$ ) основе и циклопентане. Исследованиями установлено, что в период эксплуатации ПИ-труб коэффициент теплопроводности ППУ повышается. При начальных различных значениях (теплопроводность ППУ на циклопентане ниже, чем ППУ на водной основе) со временем происходит старение структуры, и повышение коэффициента теплопроводности за счет механической деформации, диффузии газов пор. Для адекватной оценки потерь теплоты за период эксплуатации приняты данные, полученные для условий естественного старения за 30 лет эксплуатации.

4 Расчеты плотности потока и потерь теплоты при сравнении ПИ-труб на разных вспенивателях выполнены для номенклатуры ПИ-труб по СТБ 2252-2012 [1] для двухтрубной подземной бесканальной прокладки тепловых сетей в условиях эксплуатации Республики Беларусь (средние климатические условия).

По результатам расчета установлено, что процент экономии тепловой энергии от замены вспенивателя ППУ составляет 8-9 % от ППУ на водной основе ( $\text{CO}_2$ ) и не зависит от температуры теплоносителя. Большая экономия тепловой энергии получена на трубопроводах меньшего диаметра, что обусловлено соотношением площади утепляемой трубы и толщины теплоизоляции.

5 Полученные значения экономии тепловой энергии от перехода на вспениватель циклопентан будут использованы в качестве входных параметров для технико-экономического обоснования перехода к технологии с использованием циклопентана.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 СТБ 2252-2012 Трубы стальные, предварительно термоизолированные пенополиуретаном. Технические условия
- 2 «Подготовка к сокращению потребления ГХФУ: основные положения, относящиеся к использованию, альтернативам, последствиям и финансированию для стран, действующих в рамках 5-й Статьи Монреальского протокола». Материалы ГЭФ
- 3 Е.С. Павлюк, А.В. Лупачёв, М. Г. Гуляев Реализация современной технологии изготовления продукции в пенополиуретановой изоляции на основе циклопентана
- 4 E.Kręcielewska, D. Menard Warsaw Коэффициент теплопроводности изоляционного материала из изготовленных труб после реальной эксплуатации на районных сетях отопления и после производства искусственного старения в тепловой камере. Центр теплотехники Dalkia/ The 14th International Symposium on District Heating and Cooling, September 7th to September 9th, 2014, Stockholm Sweden
- 5 К.А. Шальжин О преимуществах изделий в ППУ изоляции, изготовленных с применением циклопентана
- 6 Сайт Техноконсалтинг <https://engitime.ru/statyi1/raznoe/poluchenie-teploizolyacii-iz-penopoliuretana.html#i-5>
- 7 Сайт поставщика оборудования Техмашстрой:  
[https://www.rpsk.ru/information/penopoliuretan\\_info/vspenivateli/](https://www.rpsk.ru/information/penopoliuretan_info/vspenivateli/) режим доступа 20.02.219
- 8 В.Е. Галыгин, Г.С. Баронин, В.П. Таров, Д.О. Завражин Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов, Тамбов, ТГТУ, 2012
- 9 А. А. Берлин, Ф. А. Шутов Пенополимеры на основе реакционноспособных олигомеров, М., «Химия», 1978
- 10 ТКП 45-2.04-43-2006 Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования.
- 11 ТКП 45-4.02-323-2018 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Строительные нормы проектирования
- 12 П1-2018 к ТКП 45-4.02-323-2018 Проектирование, расчет и устройство тепловой изоляции оборудования и трубопроводов
- 13 ТКП 45-4.01-29-2006 Сети водоснабжения и канализации из полимерных труб. Правила проектирования и монтажа
- 14 Методика по определению потерь тепловой энергии в сетях теплоснабжения с учетом их износа, срока и условий эксплуатации, утв. Постановлением комитета по энергоэффективности при Совете Министров Республики Беларусь 29 сентября 2006 г. N 2.

15 ГОСТ 29265-91 (ИСО 817-74) Хладагенты органические (Хладоны). Цифровые обозначения

IZOSOM.VU