



Исх. № 165901 - 05.03.2025/

Дата обновления статьи: 19.02.2025 г.

Новые результаты по исследованиям изменения теплопроводности с течением времени плит из пенополиизоцианурата (PIR) современного производства

УДК 699.86

П.П. ПАСТУШКОВ^{1,2}, канд. техн. наук (pavel-one@mail.ru)В.Г. ГАГАРИН^{1,2,3}, д-р техн. наук, проф., член-корр. РААСН (gagarinvg@yandex.ru);Д.А. ИЛЬИН^{3,4}, канд. техн. наук (ilin.d@tn.ru)И.Ф. НАГАЕВ⁴, технический директор направления ПМ и PIR (nagaev@tn.ru)

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

² Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Мичуринский проспект, 1)

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

⁴ ООО «ТехноНИКОЛЬ-Строительные Системы» (129110, г. Москва, ул. Гиляровского, д. 47, стр. 5, эт. 5, пом. I, комн. 13)

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЯМ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ ПЛИТ ИЗ ПЕНОПОЛИИЗОЦИАНУРАТА (PIR) СОВРЕМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Статья посвящена описанию комплексных исследований изменения теплопроводности плит из пенополиизоцианурата (PIR) современного производства, облицованных с двух сторон фольгой. Проведено сравнение двух методик определения установившейся теплопроводности – показано, что методика НИИСФ предпочтительна перед методикой, изложенной в ГОСТ Р 56590-2016. По результатам серии экспериментов на самом современном в РФ испытательном оборудовании найден закон изменения теплопроводности с течением времени испытанной марки PIR и значения установившейся теплопроводности при средней температуре в образце

10 и 25 °С. При использовании наиболее точного прибора по определению теплопроводности получена практически абсолютная сходимость результатов экспериментов с результатами математического моделирования по методике НИИСФ. Объяснены различия в значениях установившейся теплопроводности, которые получаются при испытаниях на разных приборах. Полученные новые результаты и методические наработки имеют большую практическую значимость в связи с расширением объема применения плит PIR в современном строительстве.

Ключевые слова

Установившаяся теплопроводность, плиты из пенополиизоцианурата, газонаполненные пластмассы, математическое моделирование

Введение

Пенополиуретаны появились более 80 лет назад. В настоящее время этот вид материала составляет самую большую долю в сегменте термореактивных полимерных эффективных утеплителей и активно применяется в строительной сфере. Самой современной модификацией полиуретанов, используемых в строительстве, является пенополиизоцианурат (PIR) [1, 2]. В работах [1, 2] описываются принципы разработки рецептур изделий из вспененного полиуретана (PUR) и полиизоцианурата (PIR), однако в них исследуются материалы 90-х годов.

Пенополиизоцианурат (PIR) относится к классу газонаполненных пластмасс. Теплопроводность таких материалов меняется с течением времени вследствие изменения газового состава в порах [3]. Авторами [4] установлены два основных фактора изменения во времени теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов: проникновение воздуха в ячейку и снижение концентрации газа в ячейках. В работах [5, 6] определено, что теплопроводность закрытоячеистых полимерных теплоизоляционных материалов (PUR) в течение длительных промежутков времени в значительной степени зависит от процессов газообмена между ячейкой и окружающей средой. Приведены результаты влияния вида газообразователя на теплопроводность PUR во времени. В работе [7] изучено изменение теплопроводности во времени плит PUR, облицованных газопроницаемыми обкладками – бумагой и стеклохолстом. Показано, что кривая изменения теплопроводности стабилизируется после первоначального роста. Полученные зависимости позволяют рассчитывать декларируемую теплопроводность PUR на весь срок службы. При этом в работе не представлены результаты исследования изделий PIR, облицованных газонепроницаемыми обкладками (фольгой). В работе [3] предложена математическая модель, описывающая изменение теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов во времени. Применимость математической модели проверена на примере плит из пенополиизоцианурата (PIR) с облицовкой из фольги.

Настоящая работа посвящена описанию результатов комплекса исследований теплопроводности плит из пенополиизоцианурата (PIR) современного производства, облицованных с двух сторон фольгой – LOGICPIR PROF Ф/Ф, проведенного за последние два года в секторе испытаний теплофизических характеристик строительных материалов лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН совместно с компанией ТЕХНОНИКОЛЬ.

Методики определения установившейся теплопроводности PIR

Как было отмечено во введении, теплопроводность пенополиизоцианурата (PIR) меняется с течением времени. Важной задачей для специалистов является определение

теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов после прекращения процесса замещения газа, закачиваемого в поры при производстве, на воздух и установления постоянной концентрации газовой смеси в ячейках – установившейся теплопроводности. Этот процесс, в зависимости от ряда факторов, может занимать достаточно длительное время, поэтому практический интерес представляют ускоренные методы такого определения.

Можно выделить два подхода к определению установившейся теплопроводности PIR: 1) подвергнуть испытываемые образцы воздействию повышенных температур, чтобы ускорить процесс диффузии газов, и после этого определить теплопроводность – такой метод положен в основу Приложения С «Определение термического сопротивления и теплопроводности после старения» ГОСТ Р 56590-2016 «Плиты на основе пенополиизоцианурата теплозвукоизоляционные. Технические условия»; 2) провести серию испытаний теплопроводности образцов через различные промежутки времени и по математической модели получить уравнение изменения теплопроводности с течением времени, а также значение установившейся теплопроводности – такая методика разработана в лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН [3] и легла в основу Методического пособия по назначению расчетных теплотехнических показателей строительных материалов и изделий [8]. На первом этапе исследований в 2020-2021 гг. был проведен сравнительный анализ результатов, полученных по двум описанным методикам.

Как такого понятия «установившейся теплопроводности» в ГОСТ Р 56590-2016 нет, есть понятие «теплопроводности после старения». Если принять, что два этих понятия близки либо вообще тождественны, то методика, описанная в Приложении С ГОСТ Р 56590-2016 и заключающаяся в сочетании метода «испытания свежизготовленного образца» и метода «с применением фиксированных приращений», вызывает ряд вопросов. Согласно описанному в действующей редакции алгоритму, определяется начальная теплопроводность образцов, далее образцы подвергаются воздействию повышенных температур (70 °С) в течение 21 суток, после этого вновь определяется теплопроводность. По результатам испытаний к начальному значению теплопроводности прибавляется фиксированное в табл. С.2 приращение. Видимо, при переводе зарубежного прообраза данного стандарта (либо же в оригинале зарубежного стандарта) допущена опечатка, и фиксированное приращение должно прибавляться к значению теплопроводности, полученному после воздействия повышенных температур, а не к начальному значению. Также достаточно условно выбран период воздействия повышенных температур – 3 недели. При этом в работе [6] отмечается, что теплопроводность образцов пенополиуретана даже после хранения в течение 39 недель при 70 °С меньше, чем теплопроводность образцов, которые хранились при комнатной температуре в течение 5 лет. В целом, Приложение С ГОСТ Р 56590-2016 слишком объемно и сложно для восприятия.

В этом плане методика, разработанная в НИИСФ [3, 8], не предлагает необоснованных дополнительных экспериментальных действий. Она заключается в серии определений теплопроводности образцов через различные промежутки времени после момента производства и расчета, по полученным данным, некоторых параметров математической модели изменения теплопроводности с течением времени газонаполненных пластмасс. Полученные экспериментальные данные подтвердили адекватность предложенной математической модели. При этом следует признать, что расчетная часть методики НИИСФ также сложна для восприятия, и ее необходимо доработать до простого в применении инженерного подхода.

Значение установившейся теплопроводности плит из пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF

Ф/Ф, полученное по методике ГОСТ Р 56590-2016 было на 0,002 Вт/(м·°С) меньше, чем полученное по методике НИИСФ. Такая разница очень существенна для исследуемого типа теплоизоляционных материалов. По совокупности замечаний к методике Приложения С ГОСТ Р 56590-2016, описанных выше, было принято решение второй этап исследований проводить по методике НИИСФ [8].

Результаты экспериментальных исследований теплопроводности PIR

Для проведения второго этапа исследований изменения теплопроводности с течением времени в сектор испытаний теплофизических характеристик строительных материалов была доставлена одна заводская упаковка плит из пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф непосредственно в день ее производства – 31.01.2021 г. Далее была проведена серия измерений теплопроводности по методике ГОСТ 7076 образцов из пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф при средней температуре в образце 10 и 25 °С спустя 1, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 120, 240 и 360 суток после производства.

Испытания проводились на приборе для измерения теплопроводности Lambda-Meter EP500e (Германия), приобретенным НИИСФ РААСН в рамках программы Минстроя РФ в 2020 году, а также (параллельно) на отечественном приборе – Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 «250», который достаточно давно используется во многих лабораториях РФ. О некоторых различиях в результатах измерений теплопроводности PIR и их причинах на разных приборах отечественного производства рассказано в работе [9].

Прибор для измерения теплопроводности Lambda-Meter EP500e имеет минимальную погрешность измерений среди всех мировых аналогов – менее 1%, позволяет испытывать образцы разных размеров – вплоть до цельных плит (рис. 1), а также измерять теплопроводность фактически во всем диапазоне температур применения строительных материалов без дополнительных операций. Он реализует одну из двух широко распространенных принципиальных схем приборов для измерения теплопроводности, описанных в том числе в ГОСТ 7076 – «прибор с горячей охранной зоной». Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 «250» реализует другую принципиальную схему – «прибора, оснащенного тепломером». Заявленная погрешность прибора – до 5%. Испытания проводятся на образцах размерами 250x250 мм. Стабильно получать результаты измерения теплопроводности на нем можно при средней температуре в образце, близкой к комнатной. Для стабильных измерений при средней температуре в образце, отличной от комнатной, необходимо помещать данный прибор в климатическую камеру, в которой создавать температуру близкую к необходимой средней температуре в образце (рис. 2).



Рис. 1 Испытание цельной плиты LOGICPIR PROF Ф/Ф на приборе Lambda-Meter EP500e

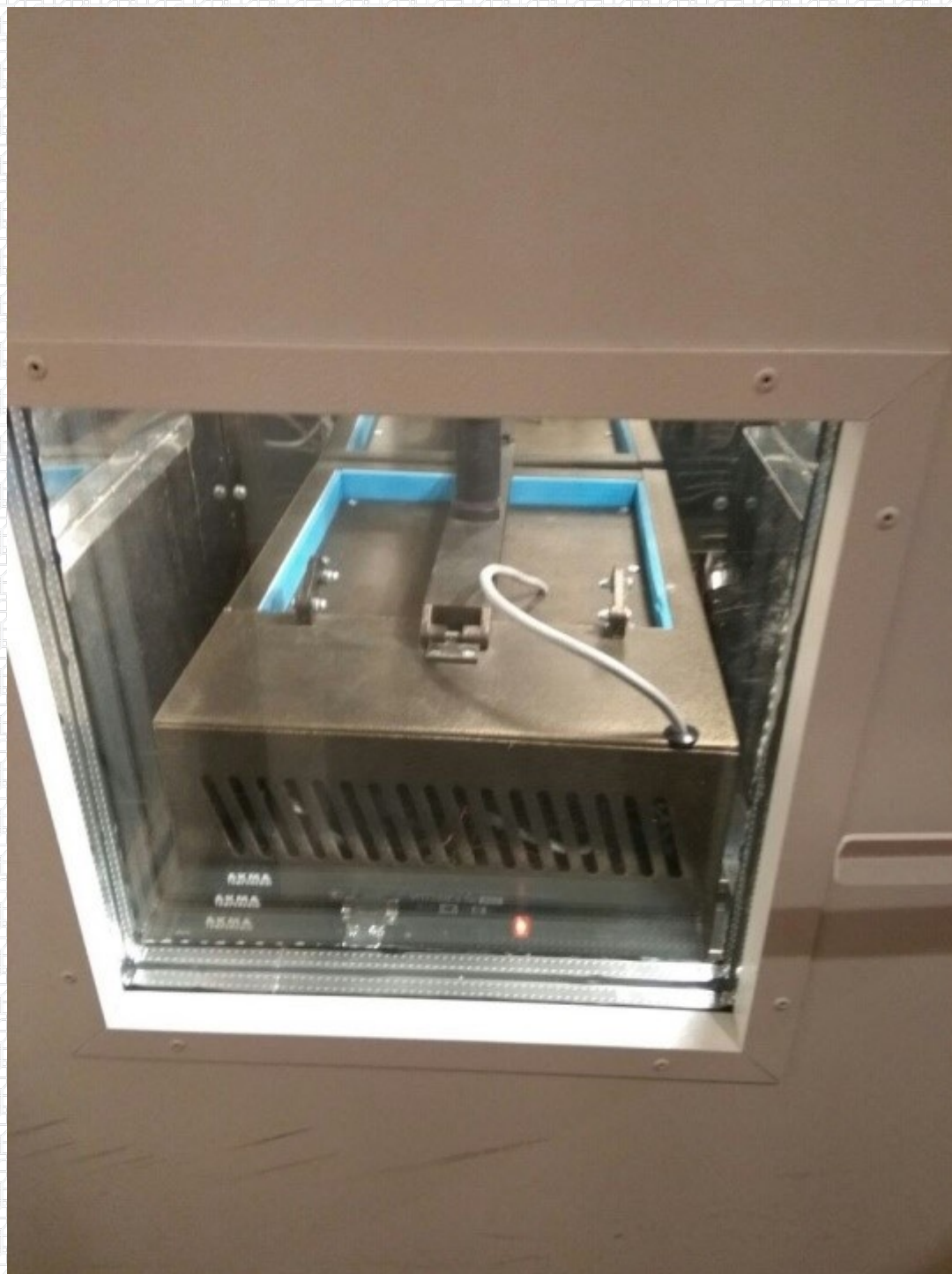


Рис. 2 Испытания на измерителе теплопроводности ИТП-МГ4 «250», помещенном в климатическую камеру

Результаты испытаний при средней температуре в образце 10 °С и 25 °С, полученные на приборе Lambda-Meter EP500e, а также при средней температуре 25 °С, полученные на измерителе ИТП-МГ4 «250», спустя различные промежутки времени после даты производства представлены в табл. 1. Результаты получены осреднением результатов испытаний 3-х образцов, вырезанных из разных мест разных плит в упаковке (образцы имели размеры 500x500 мм для измерений на приборе Lambda-Meter EP500e и 250x250 мм для измерений на ИТП-МГ4 «250»).

Табл. 1 Результаты испытаний теплопроводности образцов LOGICPIR PROF Ф/Ф

| Кол-во суток после даты производства | Испытания на приборе Lambda-Meter EP500e | | Испытания на измерителе ИТП-МГ4 «250» |
|--------------------------------------|--|--|--|
| | Теплопроводность при средней температуре 10 °С, λ_{10} , Вт/(м·°С) | Теплопроводность при средней температуре 25 °С, λ_{25} , Вт/(м·°С) | Теплопроводность при средней температуре 25 °С, λ_{25} , Вт/(м·°С) |
| 1 | 0,0185 | 0,0202 | 0,0207 |
| 3 | 0,0186 | 0,0203 | 0,021 |
| 7 | 0,0187 | 0,0204 | 0,0213 |
| 15 | 0,0188 | 0,0205 | 0,0213 |
| 30 | 0,0191 | 0,0209 | 0,022 |
| 60 | 0,0197 | 0,0214 | 0,0223 |
| 90 | 0,02 | 0,0219 | 0,0233 |
| 120 | 0,0202 | 0,0221 | 0,0237 |
| 240 | 0,0205 | 0,0224 | 0,024 |
| 360 | 0,0207 | 0,0226 | 0,0247 |

Математическое моделирование изменения теплопроводности PIR

Для использования математической модели изменения теплопроводности с течением времени, описанной в [3], были найдены необходимые параметры уравнения,

$$\lambda = \lambda_0 + [(\lambda_2 - \lambda_1)z_d] \cdot [1 - e^{-st}] \quad (1)$$

где λ_0 – теплопроводность материала в начальный момент времени (при $t=0$), Вт/(м·°С);

λ_1 – теплопроводность смеси газов, закачиваемой при производстве, Вт/(м·°С);

λ_2 – теплопроводность воздуха, Вт/(м·°С);

z_d – объемная доля дисперсной, доли ед.;

s – параметр, характеризующий скорость замены газа воздухом, сут⁻¹;

t – время, сут.

Уравнение (1) полностью определяется тремя параметрами: λ_0 , $(\lambda_1 - \lambda_2)z_d$ и s . Теплопроводность материала в начальный момент времени, λ_0 , принималась по результатам первой серии испытаний. Параметры $(\lambda_1 - \lambda_2)z_d$ и s рассчитывались по алгоритму, описанному в [8]. Данные параметры возможно определить серией экспериментов через 1, 7, 15, 30 и 60 суток после производства, но при использовании большего набора экспериментальных точек, параметры уравнения (1) будут находиться с большей точностью. В табл. 2 представлены параметры уравнения (1), определенные по результатам испытаний на приборе Lambda-Meter EP500e и на измерителе ИТП-МГ4 «250».

Табл. 2 Параметры уравнения изменения теплопроводности с течением времени

| Параметр | Испытания на приборе Lambda-Meter EP500e | | Испытания на измерителе ИТП- МГ4 «250» при средней температуре 25 °С |
|--|---|----------------------------------|--|
| | при средней температуре 10 °С | при средней температуре 25 °С | |
| λ_0 , Вт/(м·°С) | 0,0185 | 0,0202 | 0,0207 |
| $(\lambda_1 - \lambda_2)z_d$, Вт/(м·°С) | 0,0021 | 0,0023 | 0,0038 |
| s , сут ⁻¹ | 0,014 | 0,014 | 0,014 |

Подставляя найденные значения параметров в уравнение (1), получен закон изменения теплопроводности плит LOGICPIR PROF Ф/Ф при средней температуре 10 °С в зависимости от времени:

$$\lambda_{10} = 0,0185 + 0,0021 \cdot [1 - e^{-0,014t}] \text{ Вт/(м·°С)}.$$

Закон изменения теплопроводности при средней температуре 25 °С в зависимости от времени, соответственно, представляется в виде:

$$\lambda_{25} = 0,0202 + 0,0023 \cdot [1 - e^{-0,014t}] \text{ Вт/(м·°С)}.$$

На рис. 3 и 4 представлены сравнение изменения теплопроводности при средней температуре 10 и 25 °С, соответственно, плит из пенополиизоцианурата марки LOGICPIR PROF Ф/Ф с течением времени, полученное экспериментальным путем на приборе Lambda-Meter EP500e и рассчитанное по методике НИИСФ [8].

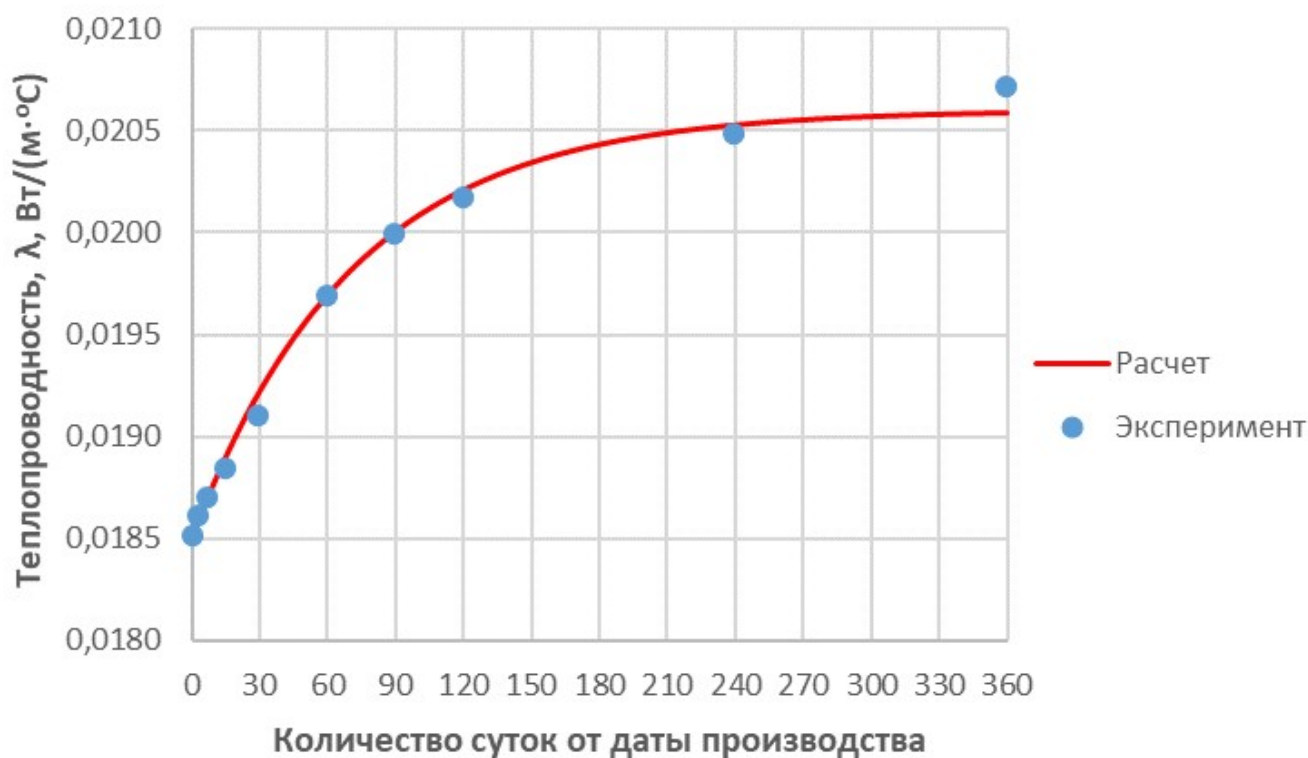


Рис. 3 Изменение теплопроводности при 10 °С плит LOGICPIR PROF Ф/Ф

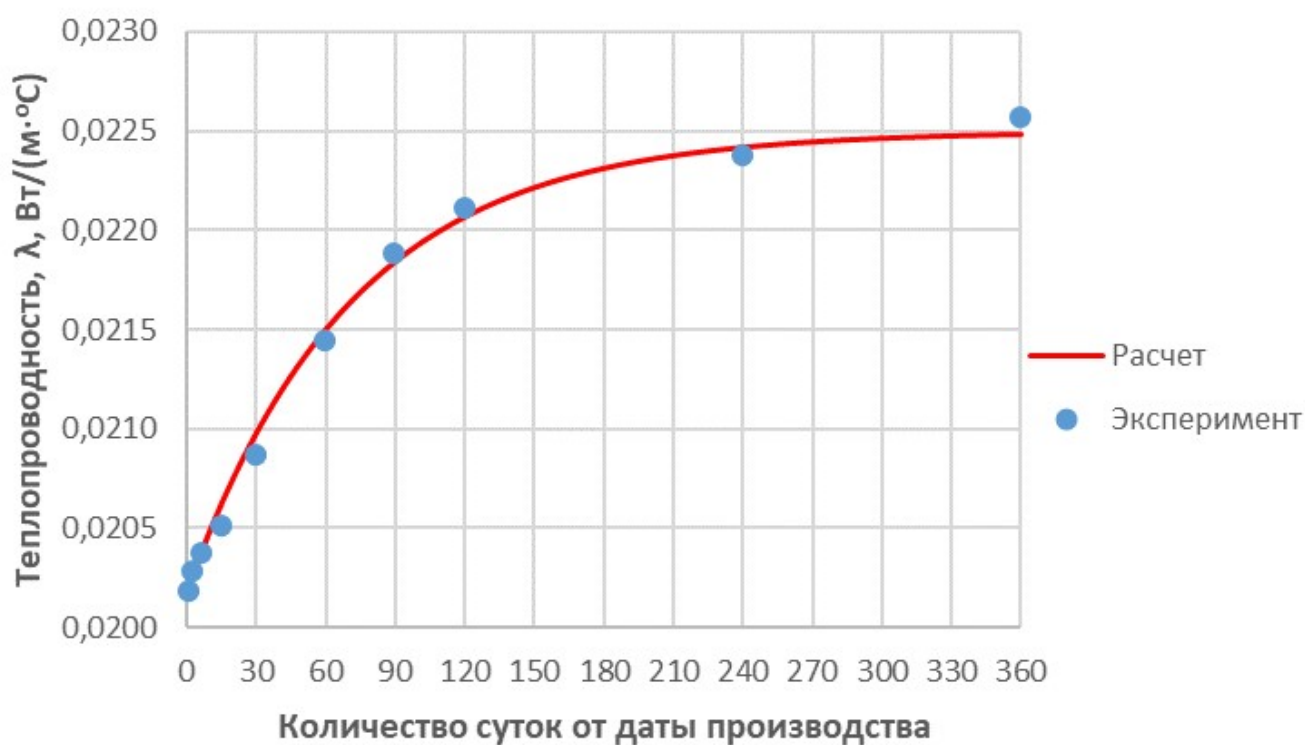


Рис. 4 Изменение теплопроводности при 25 °С LOGICPIR PROF Ф/Ф

На рис. 5 представлено подобное сравнение изменения теплопроводности при средней температуре 25 °С испытанной марки пенополиизоцианурата с течением времени, но полученное экспериментальным путем на измерителе ИТП-МГ4 «250».

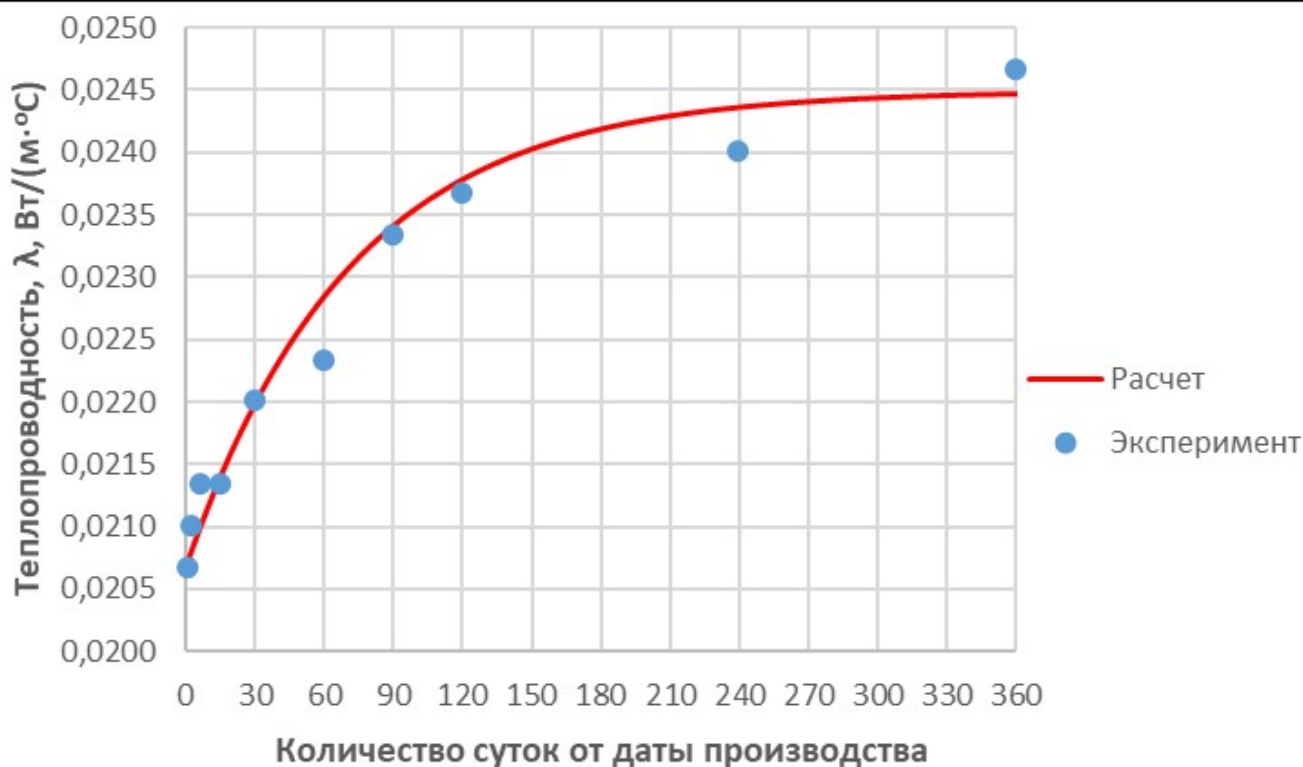


Рис. 5 Изменение теплопроводности при 25 °C LOGICPIR PROF Ф/Ф (измерения проведены на ИТП-МГ4 «250»)

Сравнение экспериментальных и расчетных данных, результаты определения установившейся теплопроводности PIR

Как видно из представленных графиков на рис. 3 и 4 результаты расчетов по формуле (1) полностью коррелируются с результатами экспериментов – расхождения в экспериментальных и расчетных данных составляют менее 1%. Таким образом, за счет использования самого точного среди мировых аналогов прибора для измерения теплопроводности Lambda-Meter EP500e была получена абсолютная сходимость результатов экспериментов с результатами математического моделирования по методике НИИСФ [8]. При этом экспериментальные точки, полученные на измерителе теплопроводности ИТП-МГ4 «250», также хорошо коррелируются с расчетом (рис. 5), но расхождение этих данных немного выше, что объясняется худшей точностью представления результатов на данном приборе – до 0,001 Вт/(м·°C) (при этом в приборе Lambda-Meter EP500e до 0,00001 Вт/(м·°C)).

Установившаяся теплопроводность, λ_{∞} , Вт/(м·°C), по методике [8] находится по формуле:

$$\lambda_{\infty} = \lambda_0 + [(\lambda_2 - \lambda_1)\zeta_d] \quad (2)$$

Таким образом, по формуле (2) установившаяся теплопроводность пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф при средней температуре в образце 10 °C составляет (с округлением до 0,001 Вт/(м·°C) согласно ГОСТ 7076):

$$\lambda_{\infty} = 0,0185 + 0,0021 = 0,021 \text{ Вт/(м·°C)};$$

при средней температуре в образце 25 °С:

$$\lambda_{\infty} = 0,0202 + 0,0023 = 0,023 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)};$$

при средней температуре в образце 25 °С при измерениях на ИТП-МГ4 «250»:

$$\lambda_{\infty} = 0,0207 + 0,0038 = 0,025 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}.$$

Более высокое значение установившейся теплопроводности, полученное по результатам испытаний образцов на измерителе ИТП-МГ4 «250» связано с большей площадью боковых граней (контактирующих с воздухом) по отношению к площади образца (по сравнению с этим отношением для испытываемых образцов на приборе Lambda-Meter EP500e). Этим же объясняются и меньшие значения теплопроводности, получаемые при испытаниях на приборе Lambda-Meter EP500e на цельной плите, в сравнении с вырезанными образцами.

Также по полученным результатам в табл. 1 для исследованной марки PIR был установлен коэффициент для пересчета теплопроводности при средней температуре 25 °С, λ_{25} , Вт/(м·°С), по значениям теплопроводности при средней температуре 10 °С, λ_{10} , Вт/(м·°С), (и наоборот) равный 1,09: .

Заключение

В секторе испытаний теплофизических характеристик строительных материалов лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН проведены комплексные исследования изменения теплопроводности плит из пенополиизоцианурата (PIR) современного производства, облицованных с двух сторон фольгой – LOGICPIR PROF Ф/Ф. Проведено сравнение двух методик определения установившейся теплопроводности – показано, что методика НИИСФ, описанная в [8], предпочтительна перед методикой, изложенной в ГОСТ Р 56590-2016. По результатам серии экспериментов на самом современном в РФ испытательном оборудовании найден закон изменения теплопроводности с течением времени испытанной марки PIR и значение установившейся теплопроводности, которое при средней температуре в образце 10 °С составило 0,021 Вт/(м·°С), при средней температуре 25 °С – 0,023 Вт/(м·°С). При использовании наиболее точного прибора по определению теплопроводности получена практически абсолютная сходимость результатов экспериментов с результатами математического моделирования по методике НИИСФ [8]. Объяснены различия в значениях установившейся теплопроводности, которые получаются при испытаниях на разных приборах. Найден коэффициент пересчета между значениями теплопроводности исследованной марки PIR при средней температуре 25 °С и 10 °С. Полученные новые результаты и методические наработки имеют большую практическую значимость в связи с расширением объема применения плит PIR в современном строительстве.

Список литературы

1. H.J.M. Grünbauer, J. Bicerano, P. Clavel, R.D. Daussin, H.A. de Vos, M.J. Elwell, H. Kawabata, H. Kramer, D.D. Latham, C.A. Martin, S.E. Moore, B.C. Obi, V. Parenti, A.K. Schrock, R. van den Boschvan. Rigid Polyurethane Foams. In book: Polymeric Foams. 2004.
2. Ashida K. Polyurethane and Related Foams: Chemistry and Technology (1st ed.). CRC Press.
3. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Изменение во времени теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов // Строительные материалы. 2017. № 6. С. 28–31.

4. Wiedermann R.E., Adam N., Kaufung R. Flame-Retarded, Rigid PUR Foams with a Low Thermal Conductivity. *Journal of Thermal Insulation*. 1988. Vol 11(4), pp. 242-253.
5. Albrecht. Cell-gas composition - An important factor in the evaluation of long-term thermal conductivity in closed-cell foamed plastics // *Cellular Polymers*. January 2000. Vol. 19(5), pp. 319-331.
6. Albrecht W. and H. Zehendner. Thermal conductivity of Polyurethane (PUR) rigid foam boards after storage at 23°C and 70°C // *Cellular Polymers*. 1997. Vol 16, pp. 35-42.
7. Albrecht W. Change over Time in the Thermal Conductivity of Ten-Year-Old PUR Rigid Foam Boards with Diffusion-Open Facings // *Cellular Polymers*. 2004. Vol. 23(3), pp. 161-172.
8. Методическое пособие по назначению расчетных теплотехнических показателей строительных материалов и изделий. М.: ФАУ «ФЦС», 2019.
9. Пастушков П.П. О проблемах определения теплопроводности строительных материалов // *Строительные материалы*. 2019. №4. С. 57-63.

Разработал:

Дмитрий Ильин

Специалист первой категории, руководитель технической поддержки направления «Полимерные мембраны и PIR»



Ответ сформирован в
базе знаний по ссылке