

**МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА
И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНСТРОЙ РОССИИ)**



**федеральное государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук»
(НИИСФ РААСН)**

Research Institute of Building Physics
Russian Academy of Architecture and Construction Science (NIISF RAACS)

УТВЕРЖДАЮ
Директор НИИСФ РААСН
Шубин И.Л.
«29» сентября 2021 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по теме:

**«Определение установившейся теплопроводности образцов из
пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф
по методике НИИСФ РААСН»**

Договор № 12010(2011) от «29» января 2021 г.

Рук. сектора испытаний теплофизических
характеристик строительных материалов,
вед. науч. сотр. лаб. строит. теплофизики, к.т.н.

П.П. Пастушков

Москва, 2021 г.

Пенополиизоцианурат – современный теплоизоляционный материал, который относится к классу газонаполненных пластмасс. Теплопроводность газонаполненных пластмасс изменяется с течением времени вследствие изменения газового состава в порах. Важной задачей для специалистов является определение теплопроводности таких материалов после прекращения процесса замещения газа, закачиваемого в поры при производстве, на воздух – установившейся теплопроводности. Этот процесс, в зависимости от ряда факторов, может занимать достаточно длительное время, поэтому практический интерес представляют ускоренные методы такого определения. Одним из наиболее точных методов является проведение серии испытаний теплопроводности образцов через различные промежутки времени и нахождение уравнения изменения теплопроводности с течением времени, а также значение установившейся теплопроводности – такая методика разработана НИИСФ РААСН и описана, в том числе, в методическом пособии ФАУ ФЦС по назначению расчетных теплотехнических показателей строительных материалов и изделий (г. Москва, 2019 г.).

В рамках договора № 12010(2011) от «29» января 2021 г. в секторе испытаний теплофизических характеристик строительных материалов лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН была проведена серия измерений теплопроводности по методике ГОСТ 7076 образцов из пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф при средней температуре в образце 10 °С и 25 °С спустя 1, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 120, 240 суток после производства с целью определения установившейся теплопроводности по методике НИИСФ РААСН при указанных средних температурах. Настоящее заключение посвящено описанию результатов этих исследований.

Для проведения исследований 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. В упаковке было 7 плит размерами 1185x600x30 мм. Для испытаний были отобраны и пронумерованы 4 плиты. Из 3-

х плит из разных мест вырезаны по 2 образца – один размерами 500x500 мм, другой 250x250 мм, 4-ю плиту для испытаний специально не разрезали. Первая цифра в нумерации образцов обозначала номер плиты, вторая – если 1, то образец имеет размеры 500x500 мм, если 2, то 250x250 мм (например, образец 3.1 обозначает, что вырезан из плиты номер 3 и имеет размеры 500x500 мм). Под номером 4 испытывался образец цельной плиты.

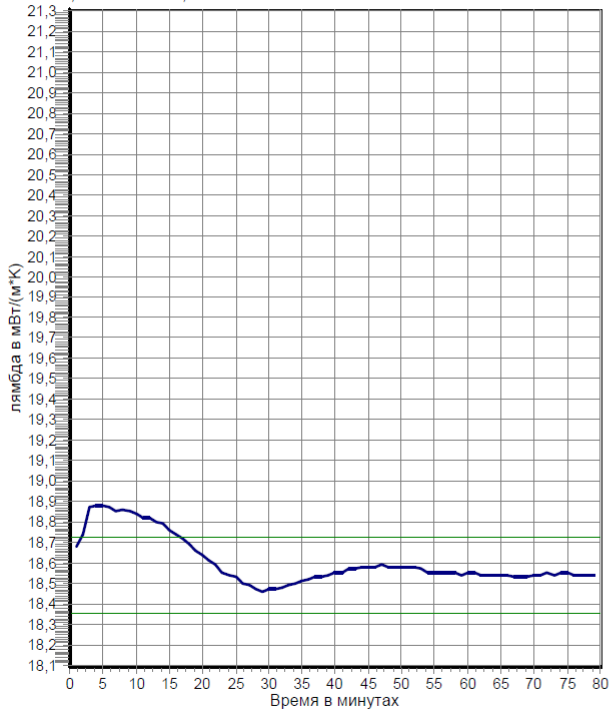
Отобранные образцы прошли кондиционирование в течение нескольких часов при температуре (23 ± 5) °С и относительной влажности воздуха (40 ± 5) %. Испытания образцов с размерами 500x500 мм и цельной плиты проводились на приборе для измерения теплопроводности Lambda-Meter EP500e (свидетельство о поверке № 2413/2178-2020, действительно до 22.12.2021 г.), образцов с размерами 250 x250 мм на измерителе теплопроводности ИТП-МГ4 «250» (свидетельство о поверке № МА 0109529, действительно до 27.12.2022 г.). Испытания на приборе Lambda-Meter EP500e проводились при средней температуре в образце 10 °С и 25 °С (испытаний на каждом образце проводились последовательно сначала при средней температуре 10 °С, далее при 25 °С) и перепаде температур между пластинами прибора в 15 °С, на измерителе ИТП-МГ4 «250» только при средней температуре 25 °С и перепаде температур между пластинами в 25 °С. Испытания проводились в соответствии с методикой ГОСТ 7076-99.

Первая серия испытаний теплопроводности была проведена в течение 24 ч с момента производства. Далее серии испытаний были повторены спустя 3, 7, 15, 30, 60, 90, 120, 240 суток от даты производства.

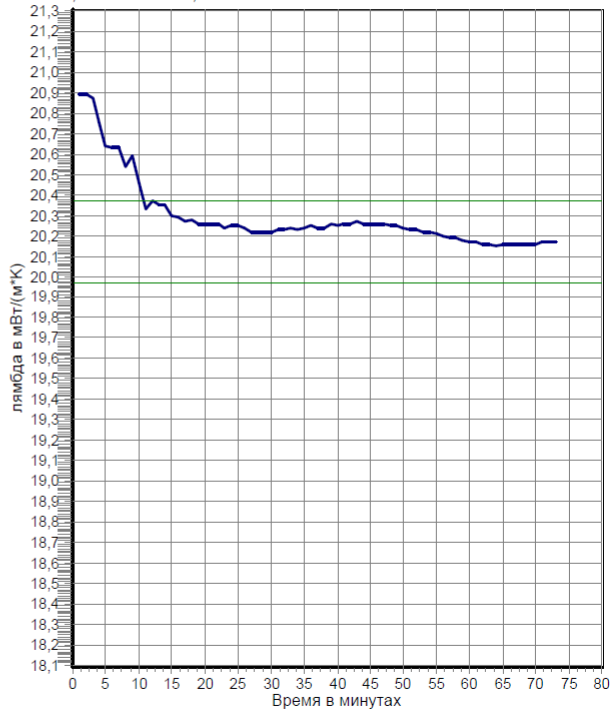
Представление результатов начальных испытаний на приборе Lambda-Meter EP500e приведено на рис. 1. Процесс испытания цельной плиты (образец № 4) на приборе Lambda-Meter EP500e представлен на рис. 2.

а) образец № 1.1

LOGICPIR_1_2_1 - 21_01_02_1_2_1 при 10°C
 C:\Users\m_100\AppData\Roaming\Lambda Messtechnik\UserData\PIR.DBF
 01.02.2021 20:12:56
 лямбда = 18,54 мВт/(м²К)
 Тв = 17,500°C Тн = 2,498°C

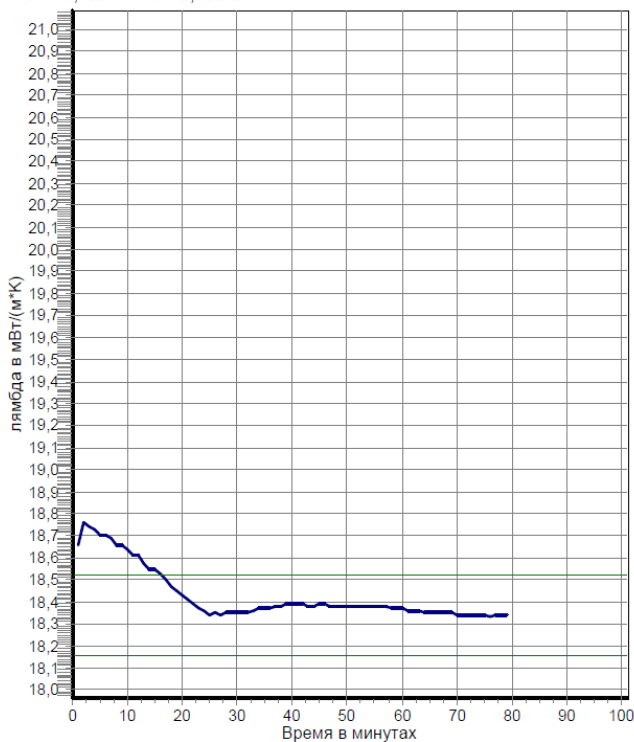


LOGICPIR_1_2_1 - 21_01_02_1_2_1 при 25°C
 C:\Users\m_100\AppData\Roaming\Lambda Messtechnik\UserData\PIR.DBF
 01.02.2021 22:35:56
 лямбда = 20,17 мВт/(м²К)
 Тв = 32,498°C Тн = 17,498°C

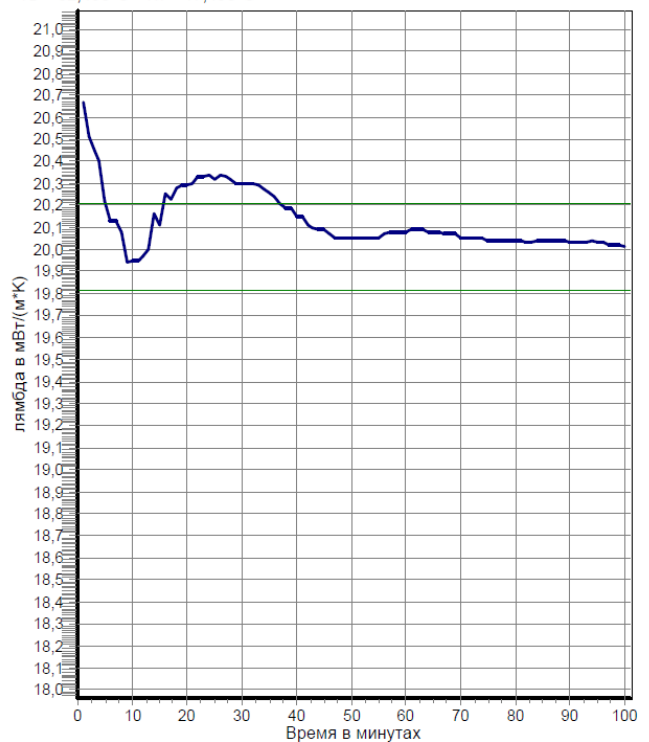


б) образец № 2.1

LOGICPIR_1_1_1 - 21_01_02_1_1_1 при 10°C
 C:\Users\m_100\AppData\Roaming\Lambda Messtechnik\UserData\PIR.DBF
 01.02.2021 13:26:39
 лямбда = 18,34 мВт/(м²К)
 Тв = 17,498°C Тн = 2,500°C

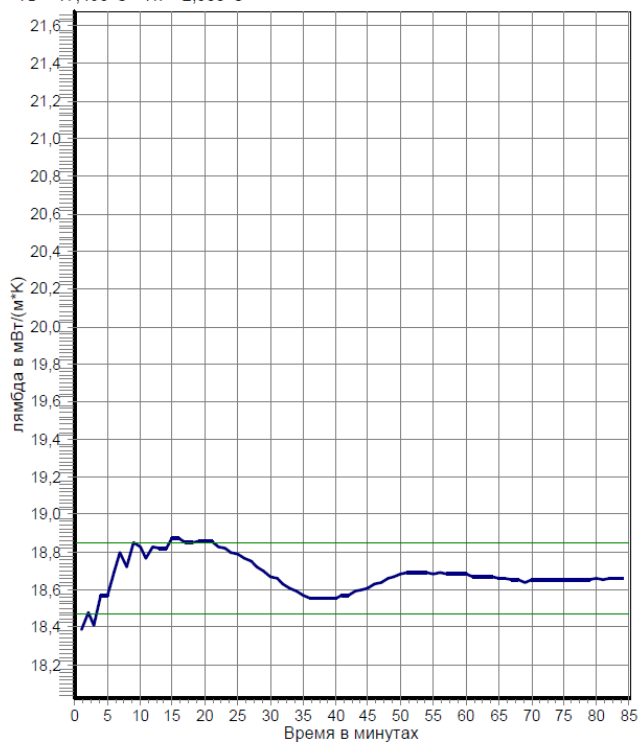


LOGICPIR_1_1_1 - 21_01_02_1_1_1 при 25°C
 C:\Users\m_100\AppData\Roaming\Lambda Messtechnik\UserData\PIR.DBF
 01.02.2021 15:54:39
 лямбда = 20,01 мВт/(м²К)
 Тв = 32,498°C Тн = 17,498°C



в) образец № 3.1

LOGICPIR_1_3_1 - 21_01_02_1_3_1 при 10°C
C:\Users\m_100\AppData\Roaming\Lambda Messtechnik\UserData\PIR.DBF
02.02.2021 13:11:13
лямбда = 18,66 мВт/(м*К)
Тв = 17,498°C Тн = 2,500°C



LOGICPIR_1_3_1 - 21_01_02_1_3_1 при 25°C
C:\Users\m_100\AppData\Roaming\Lambda Messtechnik\UserData\PIR.DBF
02.02.2021 15:41:13
лямбда = 20,44 мВт/(м*К)
Тв = 32,498°C Тн = 17,498°C

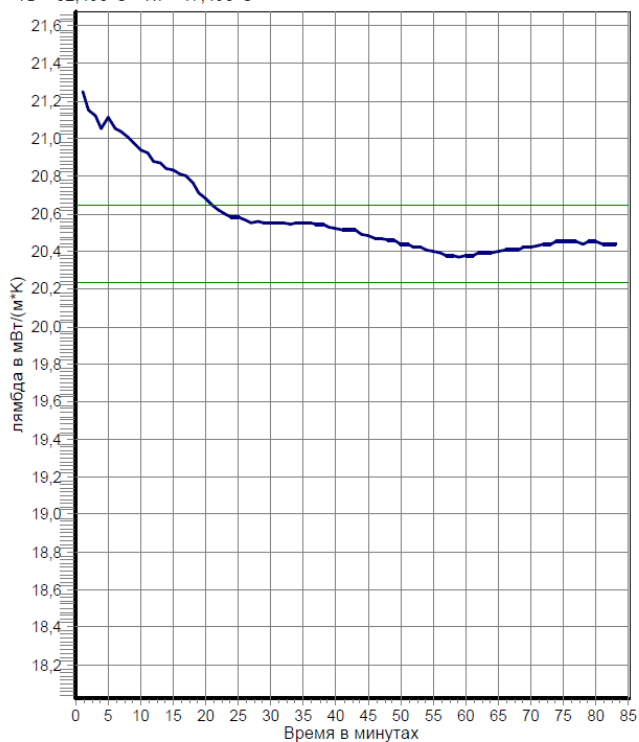


Рис. 1 Результаты измерений теплопроводности в течение 24 ч с момента производства разных образцов пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф: график слева при средней температуре в образце 10 °С, справа – при средней температуре в образце 25 °С



Рис. 2 Процесс измерения теплопроводности плиты из пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф на приборе Lambda-Meter EP500e

Результаты испытаний при средней температуре в образце 10 °С представлены в табл. 1, при средней температуре 25 °С – в табл. 2.

Табл. 1 Результаты испытаний теплопроводности при средней температуре 10 °С

Номер образца	Теплопроводность в сухом состоянии при средней температуре 10 °С, λ_{10} , Вт/(м·°С)								
	1 сутки	3 суток	7 суток	15 суток	30 суток	60 суток	90 суток	120 суток	240 суток
1.1	0,01834	0,01846	0,01830	0,01856	0,01878	0,01925	0,01941	0,01968	0,01980
2.1	0,01854	0,01866	0,01891	0,01899	0,0192	0,01987	0,02037	0,02049	0,02097
3.1	0,01866	0,01870	0,01888	0,01898	0,01933	0,01995	0,02018	0,02033	0,02068
4	0,01832	0,01844	0,01857	0,01851	0,01862	0,01917	0,01959	0,01964	0,01979
Среднее значение*	0,0185	0,0186	0,0187	0,0188	0,0191	0,0197	0,0200	0,0202	0,0205

* Среднеарифметическое значение теплопроводности по результатам испытаний образцов № 1.1, 2.1, 3.1, размерами 500х500 мм, испытанных на приборе Lambda-Meter EP500e

Табл. 2 Результаты испытаний теплопроводности при средней температуре 25 °С

Номер образца	Теплопроводность в сухом состоянии при средней температуре 10 °С, λ_{10} , Вт/(м·°С)								
	1 сутки	3 суток	7 суток	15 суток	30 суток	60 суток	90 суток	120 суток	240 суток
1.1	0,02001	0,02013	0,02003	0,02026	0,02062	0,02091	0,02135	0,02162	0,02165
1.2	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022	0,023	0,023	0,023
2.1	0,02017	0,02027	0,02054	0,02059	0,02085	0,02157	0,02218	0,02252	0,02292
2.2	0,021	0,021	0,022	0,022	0,023	0,023	0,024	0,024	0,025
3.1	0,02036	0,02044	0,02055	0,02067	0,02113	0,02183	0,02212	0,02219	0,02255
3.2	0,020	0,021	0,021	0,021	0,022	0,022	0,023	0,024	0,024
4	0,02001	0,02015	0,02027	0,02025	0,02043	0,02096	0,02143	0,02171	0,02198
Среднее значение*	0,0202	0,0203	0,0204	0,0205	0,0209	0,0214	0,0219	0,0221	0,0224
Среднее значение ИТП**	0,0207	0,0210	0,0213	0,0213	0,0220	0,0223	0,0233	0,0237	0,0240

* Среднеарифметическое значение теплопроводности по результатам испытаний образцов № 1.1, 2.1, 3.1, размерами 500х500 мм, испытанных на приборе Lambda-Meter EP500e

** Среднеарифметическое значение теплопроводности по результатам испытаний образцов № 1.2, 2.2, 3.2, размерами 250х250 мм, испытанных на измерителе ИТП-МГ4 «250»

Для использования разработанной математической модели изменения теплопроводности были найдены необходимые параметры уравнения

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

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

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

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

ζ_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 , $(\lambda_1 - \lambda_2)\zeta_d$ и s . Теплопроводность материала в начальный момент времени, λ_0 , принималась по результатам первой серии испытаний. Параметры $(\lambda_1 - \lambda_2)\zeta_d$ и s рассчитывались по алгоритму, описанному в методическом пособии ФАУ ФЦС по назначению расчетных теплотехнических показателей строительных материалов и изделий. В табл. 3 представлены параметры уравнения (1), определенными по результатам испытаний на приборе Lambda-Meter EP500e и на измерителе ИТП-МГ4 «250».

Табл. 3 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
$(\lambda_1 - \lambda_2)\zeta_d$, Вт/(м·°С)	0,0021	0,0023	0,0021
s , сут ⁻¹	0,014	0,014	0,014

Подставляя найденные значения параметров в уравнение (1), получен закон изменения теплопроводности 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:

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

При этом, если учитывать испытания только на измерителе ИТП-МГ4 «250», то он записывается следующим образом:

$$\lambda_{25}=0,0207+0,0034\cdot[1-e^{-0,014t}] \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}.$$

На рис. 3 представлено сравнение изменения теплопроводности при средней температуре 10 °С испытанной марки пенополиизоцианурата с течением времени, полученное экспериментальным путем и рассчитанное по методике НИИСФ РААСН.

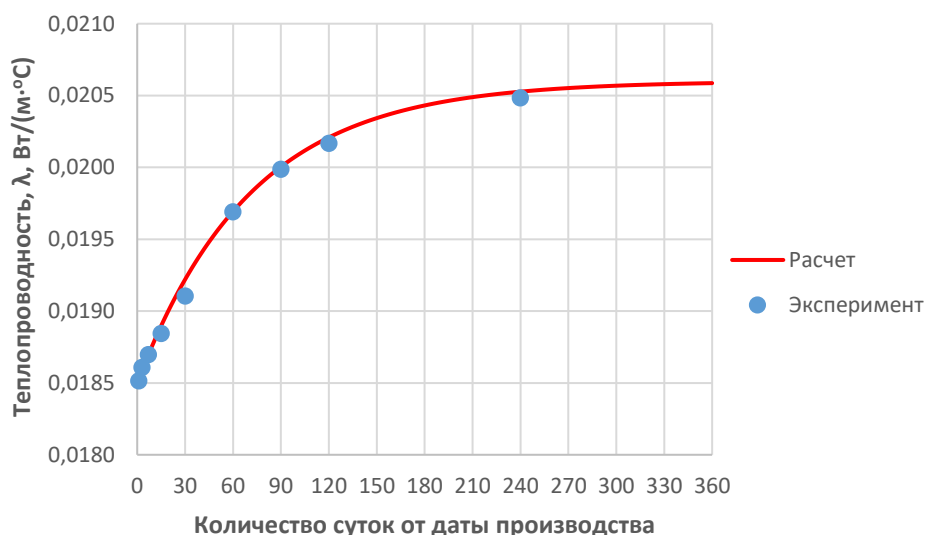


Рис. 3 Изменение теплопроводности при 10 °С пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф

На рис. 4 представлено сравнение изменения теплопроводности при средней температуре 25 °С испытанной марки пенополиизоцианурата с течением времени, полученное экспериментальным путем и рассчитанное по методике НИИСФ РААСН.

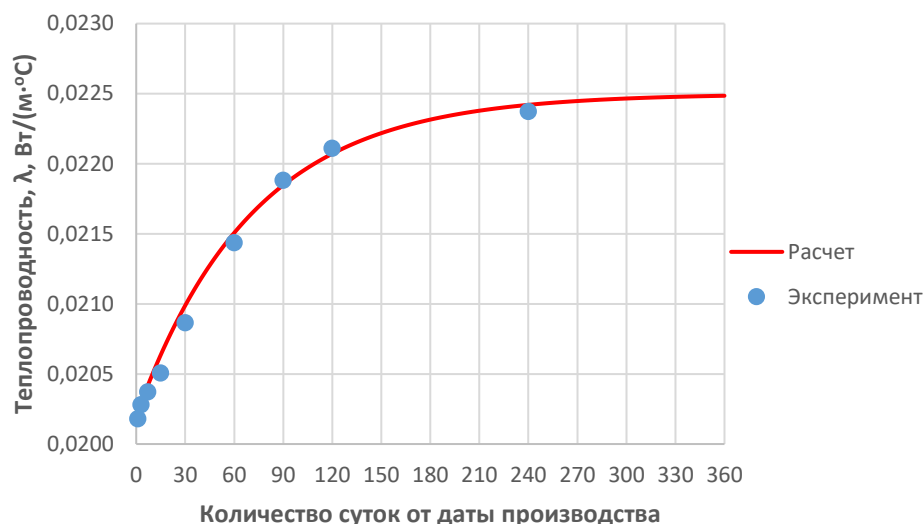


Рис. 4 Изменение теплопроводности при 25 °С пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф

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

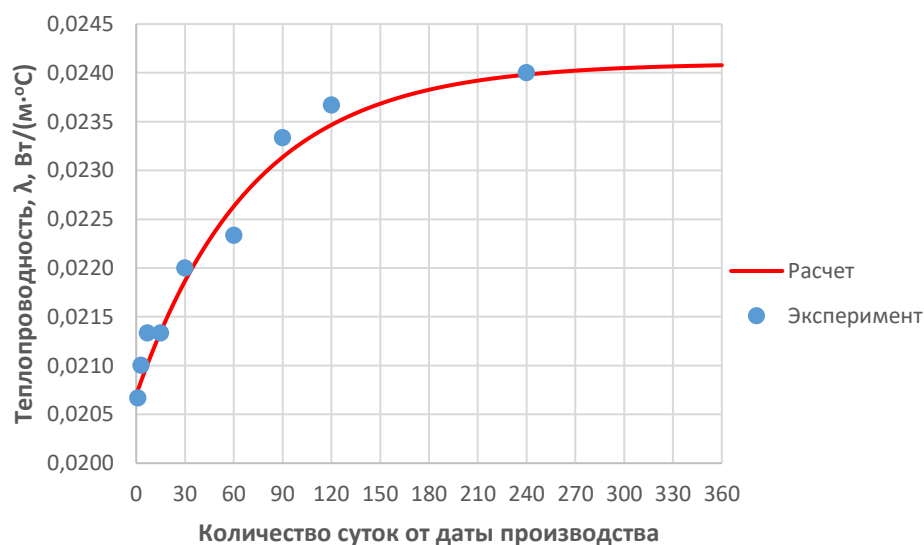


Рис. 5 Изменение теплопроводности при 25 °С (измеренное на ИТП-МГ4 «250») пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф

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 РААСН. 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 точностью представления результатов на данном приборе до 0,001 Вт/(м·°С) (в приборе Lambda-Meter EP500e до 0,00001 Вт/(м·°С)).

Установившаяся теплопроводность, λ_{∞} , Вт/(м·°С), по методике НИИСФ РААСН находится по формуле:

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

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

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

при средней температуре в образце 25 °С:

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

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

$$\lambda_{\infty} = 0,0207 + 0,0034 \approx 0,024 \text{ Вт/(м·°С)}.$$

Более высокое значение установившейся теплопроводности, полученное по результатам испытаний образцов на измерителе ИТП-МГ4 «250», возможно 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 возможно объясняются меньшие значения теплопроводности, получаемые при испытаниях на цельной плите, в сравнении с вырезанными образцами. Данный вывод нужно подтвердить дополнительными исследованиями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований определены значения установившейся теплопроводности по методике НИИСФ РААСН образцов из пенополиизоцианурата LOGICPIR PROF Ф/Ф. При средней температуре в образце 10 °С установившаяся теплопроводность составила $\lambda_{\infty} \approx 0,021$ Вт/(м·°С); при средней температуре в образце 25 °С – $\lambda_{\infty} \approx 0,023$ Вт/(м·°С).