

---

# Теплопроводность пенополистирольных плит в зависимости от увлажнения

---

**Иван Гнип,  
Владислав Кершулис,  
Сигитас Веялис**

*Институт «Термоизоляция»,  
Лаборатория применения  
строительных материалов,  
ул. Линкмяну, 28,  
2600, Вильнюс*

Экспериментально определено влияние влагосодержания полистирольных пенопластовых плит на их коэффициент теплопроводности.

Вычислены величины поправок коэффициента теплопроводности полистирольного пенопласта  $\Delta\lambda_w$ , W/(m·K), учитывающие дополнительное его увлажнение в невентилируемых ограждающих конструкциях. Показана возможность снижения проектных значений коэффициентов теплопроводности этих материалов за счет более точного учета их увлажнения и предложены вычисленные величины поправок коэффициента теплопроводности полистирольного пенопласта, учитываемые в новой редакции STR 2.01.03:1999.

**Ключевые слова:** коэффициент теплопроводности, влияние влажности, поправка коэффициента теплопроводности на увлажнение, полистирольный пенопласт

---

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее эффективных утеплителей для строительных конструкций являются плиты из полистирольного пенопласта, производство и применение которых непрерывно расширяются. Повышенный интерес к ним объясняется благоприятным сочетанием их физико-механических свойств: малой плотностью и низкой теплопроводностью при сравнительно высоких механических характеристиках.

При проектировании ограждающих конструкций с утеплителем из пенополистирольных плит наибольшее значение имеет изменение их теплопроводности, обусловленное их влажностным состоянием. В работе исследована теплопроводность этих изделий при различной степени их увлажнения.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение коэффициента теплопроводности влажных образцов пенополистирольных плит проводили согласно [1] на образцах в виде пластин размерами 250 × 250 мм и толщиной 25–32 мм при средней температуре образцов  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$  и величине температурного перепада в приборе  $(14 \pm 0,7)^\circ\text{C}$ . Увлажнение предварительно высушенных и взвешенных образцов производили диффузией водяного пара с

конденсацией его в материале в специальном устройстве [2]. Образец размещали над водяной баней термостата с температурой  $(35\text{--}40)^\circ\text{C}$ , а над ним располагали плоский водоохлаждаемый холодильник. Между образцом и холодильником помещали антиконденсационную пленку, которая свободно пропускала водяные пары и предотвращала попадание конденсированной влаги на образец. Ежедневно образец переворачивали для более равномерного увлажнения и с пленки удаляли конденсат. Перед измерением теплопроводности образцы выдерживали в среде с относительной влажностью воздуха  $\sim 100\%$  при температуре  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ .

Промежуточные значения (между максимальным и минимальным) влагосодержания образцов получали высушиванием на воздухе с последующим выдерживанием во влажной воздушной среде для выравнивания влагосодержания по объему. Фактическую влажность образцов вычисляли по их массе сразу после измерения теплопроводности.

Влияние влажности образцов на их коэффициент теплопроводности оценивали величиной  $\Delta\lambda_w$ , %, вычисляемой по формуле

$$\Delta\lambda_w = \frac{\lambda_w - \lambda_0}{\lambda_0} \cdot 100, \quad (1)$$

Таблица. Сведения о пенополистирольных плитах, по влажным образцам которых определяли их коэффициент теплопроводности

Марка плит по плотности	Плотность образцов, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, W/m·K	Пределы изменения влажности образцов, мас.%	Количество определений коэффициента теплопроводности влажных образцов
М 12	12,0	0,0433	11,1	1
	12,1	0,0435	28,8–5,9	3
	12,1	0,0439	19,1	1
	12,2	0,0427	31,4–2,0	4
	12,4	0,0426	7,2–3,2	2
	13,0	0,0433	52,2–7,2	8
	13,0	0,0431	40,6–11,0	2
	13,0	0,0426	30,9–0,7	5
	13,5	0,0423	43,5–0,4	2
	13,6	0,0445	42,7–0,1	4
	13,7	0,0423	33,6–11,8	4
	13,8	0,0415	36,4–0,2	3
	14,7	0,0393	13,6–0,1	3
	14,8	0,0400	1,0	1
	14,9	0,0389	6,4–1,0	3
М 17	17,0	0,0375	35,1–2,2	4
	17,1	0,0364	1,6–0,5	2
	17,6	0,0368	40,8–0,5	10
	17,7	0,0382	20,0–10,1	2
	18,6	0,0383	47,0–0,1	3
	19,3	0,0381	20,2–7,6	2
М 20	21,1	0,0374	3,0	1
	21,3	0,0370	13,2–3,0	3
	21,3	0,0374	1,5–0,6	2
	21,7	0,0347	30,5	1
	22,1	0,0366	7,3–4,6	2
	22,3	0,0369	7,8–3,9	2
	22,5	0,0364	19,9–2,6	3
	22,5	0,0365	16,9–3,4	3
М 30	23,0	0,0370	42,1–1,5	7
	32,6	0,0340	1,7	1
	33,3	0,0350	1,4	1
	33,5	0,0342	2,6–0,7	3

где  $\lambda_w$ ,  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности влажных и сухих образцов соответственно, W/(m · K).

Исследованы образцы пенополистирольных плит марок М 12, М 17, М 20, М 30 [3], изготавливаемых литовскими производителями с применением различных сырьевых материалов. Сведения об исследованных образцах и результаты экспериментальных измерений приведены в таблице.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работах [2, 4] отмечено, что влияние плотности полистирольного пенопласта при его увлажнении может заметно проявляться в начальном диапазоне увлажнения (до 5–8 мас.%):

чем плотнее пенополистирол, тем меньше растет теплопроводность. Однако эта зависимость искажается влиянием структуры полистирола.

На основании экспериментальных результатов по теплопроводности влажных образцов (совместно для плит М 12, М 17, М 20, М 30) получена аппроксимирующая зависимость  $\Delta\lambda_w$ , % от влагосодержания  $W$ , мас.% (рис. 1а) [5, 6]:

$$\Delta\lambda_w = 1,54 \cdot W^{0,40}, \quad (2)$$

со средней квадратической погрешностью  $S_{tar} = 1,43\%$  (абсолютной величиной средней меры отклонений опытных значений от рассчитанных по уравнению (2), постоянной для всех ее участков) [7].

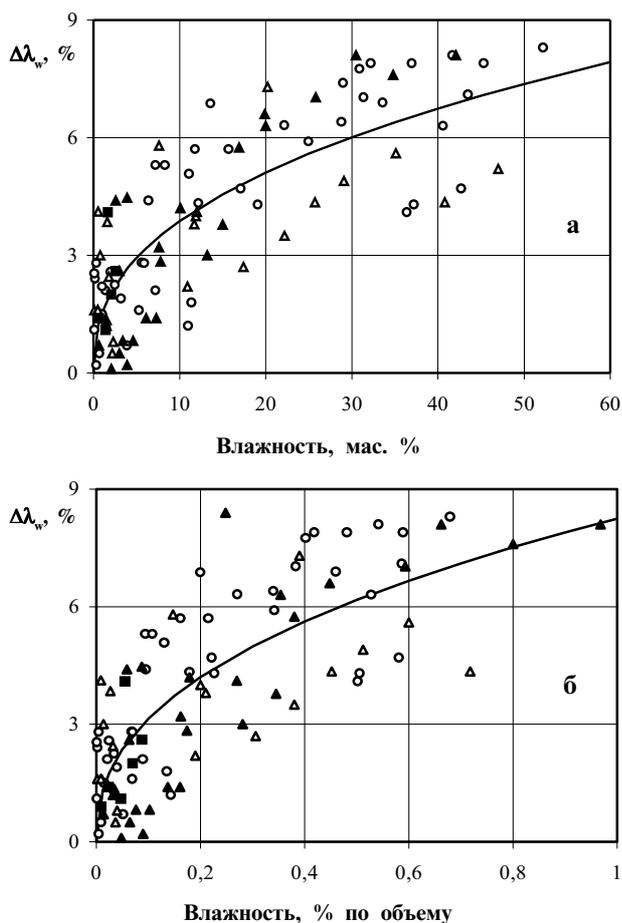


Рис. 1. Увеличение коэффициента теплопроводности пенополистирольных плит в зависимости от их влагосодержания мас.% (а) и % по объему (б).

Плотность плит, кг/м<sup>3</sup>: ○ – (12,0–14,9); Δ – (17,0–19,3); ▲ – (21,1–23,0); ■ – (32,6–33,5). Сплошные кривые соответствуют регрессионным уравнениям: а – (2); б – (3)

На рис. 1а представлена зависимость увеличения теплопроводности влажного пенопласта от величины влажности в диапазоне изменения до 52 мас.%. При малых значениях влагосодержания наблюдается резкое увеличение коэффициента теплопроводности, переходящее в слабый рост при повышении влажности.

Если экспериментальные данные аппроксимировать в интервале влажности от 0 до 52 мас.% прямыми линиями, то при влагосодержании (6–8) мас.% проявилась бы точка перелома, по достижении которой скорость увеличения значения коэффициента теплопроводности резко снижается.

В формуле (2) влажность образцов представлена мас.%, так как гигроскопическое влагосодержание полистирольного пенопласта пропорционально в широких пределах их плотности и, таким образом, при указании влаго-

содержания мас.% оно имеет одинаковое значение при любой плотности плит.

Однако имеющиеся опубликованные результаты по теплопроводности влажных пенополистирольных плит во многих случаях представлены в зависимости от влагосодержания в процентах по объему. Поэтому экспериментальные данные настоящей работы дополнительно представлены аналогичным способом. Математико-статистическая обработка экспериментальных данных [5, 6] позволяет зависимость  $\Delta\lambda_w, \%$  от  $W, \%$  по объему аппроксимировать регрессионным уравнением (рис. 1б):

$$\Delta\lambda_w = 8,25 \cdot W^{0,42}, \quad (3)$$

со средней квадратической погрешностью  $S_{tar} = 1,52\%$ .

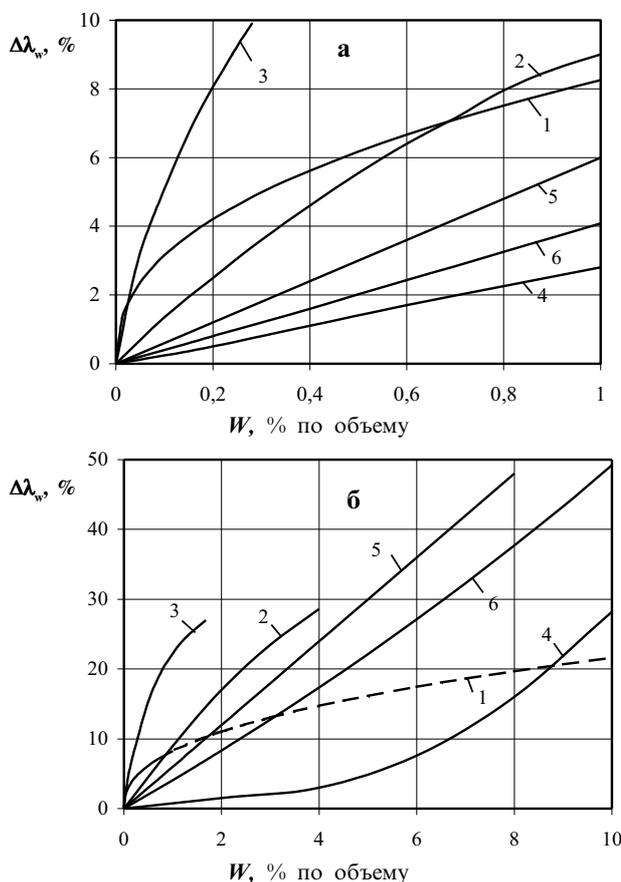


Рис. 2. Увеличение коэффициента теплопроводности пенополистирольных плит в зависимости от их объемной влажности (а – в интервале выполненных измерений).

Кривые и плотность плит,  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>: 1 – согласно регрессионному уравнению (3),  $\rho = (12,0–33,5)$ ; 2 – согласно [8],  $\rho = 30,0$ ; 3 – то же [9],  $\rho = 24,0$ ; 4 – [10],  $\rho = 19,1$ ; 5 – [11],  $\rho = (20,0–40,0)$ ; 6 – [12], плотность плит не ограничена, влажность плит не выше 15% по объему

На рис. 2а, б представлены результаты исследований, опубликованные в отдельных работах [8–12], а полученная в итоге наших экспериментов зависимость (3) изображена кривой 1.

В проведенных нами настоящих экспериментах влагосодержание образцов выдерживали в интервале до 1,0% по объему (рис. 1б и 2а), а в опубликованных работах [10, 12] имеются результаты теплопроводности пенопласта с влажностью до 10% по объему (рис. 2б).

Определение теплопроводности влажных материалов связано со значительными трудностями, вследствие чего результаты представленных исследований (рис. 2а, б) противоречивы.

Во влажном капиллярно-пористом теле наряду с переносом энергии в виде тепла происходит перенос энергии за счет массопереноса [13, 14]. Чтобы определить истинный коэффициент теплопроводности влажного материала, необходимо свести массоперенос к минимуму. В зависимости от градиента температуры, средней температуры образца, продолжительности испытаний результаты опытов могут быть разными.

Теплопроводность влажного пенополистирола, согласно [8, 9] (рис. 2а, б; кривые 2 и 3) и по выполненным экспериментам (рис. 2а, б; кривая 1), определена методом стационарного теплового потока. Различие этих результатов можно объяснить тем, что в экспериментах в разной степени удавалось свести массообмен к минимуму.

Согласно ISO 10456:1997(E), влияние влажности пенополистирола на его коэффициент теплопроводности при средней температуре +10°C оценивают по формуле

$$F_m = e^{f_\psi \Delta \psi}, \quad (4)$$

где  $F_m$  – расчетный коэффициент, учитывающий влияние объемного влагосодержания материала на его коэффициент теплопроводности;  $f_\psi$  – постоянный коэффициент объемной влажности материала (для полистирольного пенопласта принимается равным 4,0);  $\Delta \psi$  – объемное влагосодержание, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Как видно из рис. 2а, б, различие между кривыми 1 (экспериментальные результаты настоящей работы) и б (согласно ISO 10456) весьма значительное. Например, при влагосодержании 1% по объему увеличение  $\Delta \lambda_\psi$  составляет 8 и 4% соответственно. Значительное различие наблюдаем также между кривыми 4 и б

[10, 12]. Обоснование зависимости (4) не аргументировано. Однако можно отметить, что ее применение с тем же значением коэффициента  $f_\psi$  предложено и для минераловатных, стекловолокнистых изделий, что практически не учитывает различий в структуре полимерных и неорганических волокнистых материалов. Проведенные исследования [15] теплоизоляционных материалов с преобладающей открытой пористой структурой выявили резкое увеличение коэффициента теплопроводности при низком влагосодержании, переходящее в слабый рост при больших значениях влажности материала. Эксперименты выполнены с применением полупроводниковых цилиндрических зондов, обладающих большой температурной чувствительностью и позволяющих снизить рабочие температурные перепады на границе зонд–испытуемый материал, что очень важно для измерений во влажных материалах. Зависимость (4), на наш взгляд, не отражает ни явления, подвергнутого исследованиям [15], ни того, что характер зависимостей коэффициента теплопроводности от влагосодержания материала определяется формой связи влаги с материалом, его структурой и видом массопереноса. Таким образом, эта зависимость для учета влияния влагосодержания полистирольных пенопластовых плит на их коэффициент теплопроводности не вполне согласуется как с теорией, так и с экспериментом и требует уточнения.

Примененная в настоящих исследованиях методика и последующая выборочная проверка подтвердили отсутствие сколько-нибудь значительной неравномерности распределения влаги в исследуемых образцах при вышеуказанном перепаде температур в приборе. Согласно [16], потеря влаги образцами в приборе происходит в период, предшествующий установлению постоянного режима, и не отражается на величине коэффициента теплопроводности. Поэтому полученные экспериментальные величины коэффициентов теплопроводности влажных образцов достаточно точно могут характеризовать наиболее вероятные их значения.

Коэффициент теплопроводности полистирольного пенопласта зависит от таких факторов, как химический состав сырья, структуры самого пенопласта, от количества, размера и расположения пор, а также от технологических факторов. Поэтому при определении увеличения теплопроводности полистирольного пенопласта от влагосодержания следует отдавать предпочтение результатам настоящего экспе-

римента, аппроксимированным регрессионными уравнениями (2) и (3).

#### 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для того, чтобы точнее оценить поправку коэффициента теплопроводности пенополистирольных плит  $\Delta\lambda_w$ , W/(m · K), обычно принимаемую согласно [17] и учитывающую дополнительное их увлажнение в ограждающих конструкциях при расчете проектного значения коэффициента теплопроводности, необходимо знать возможное влагосодержание пенопласта в ограждении и степень увеличения его коэффициента теплопроводности в зависимости от влагосодержания.

Согласно [18], предельное допустимое приращение влагосодержания полистирольного пенопласта в ограждающих конструкциях может достигать 23 мас.%. В этом случае по уравнению (2) среднее значение увеличения коэффициента теплопроводности  $\Delta\bar{\lambda}_w$ , %, увлажненного пенопласта составит 5,4%, или, нормируя это увеличение по наибольшему значению [19], получим

$$\max \Delta\lambda_w = \Delta\bar{\lambda}_w + k_2 \cdot S_{tar} = 5,4 + 1,28 \cdot 1,43 = 7,2\% , \quad (5)$$

где  $k_2$  – толерантный (допускаемый) множитель для верхней односторонней доверительной квантили  $p = 0,9$  с вероятностью  $(1 - \alpha) = 0,9$ , определяемый по объему генеральной совокупности  $\Sigma n = 98$  согласно табл. 8. из [17].

Согласно [3], полистирольные пенопластовые плиты марок М 12–М 45 имеют класс теплопроводности от 0,045 до 0,033 W/(m · K). Тогда на основании экспериментальных результатов и представленных сведений о расчетном массовом влагосодержании полистирольного пенопласта в невентилируемых ограждающих конструкциях поправка  $\Delta\lambda_w$ , W/(m · K), составит для плит плотностью до 17 кг/м<sup>3</sup> – 0,004, а плотностью выше 17 кг/м<sup>3</sup> – 0,003 W/(m · K). Эти значения значительно ниже величины поправки, приведенной в регламенте [17].

Аналогичным образом следовало бы пересмотреть поправки  $\Delta\lambda_w$ , W/(m · K), учитывающие дополнительное увлажнение пенополистирольных плит в грунте (см. [17], табл. 4), однако для этого требуются дополнительные эксперименты или данные других исследователей по их влажностному состоянию в этой области применения.

Представленную здесь информацию о величине  $\Delta\lambda_w$ , W/(m · K), полистирольного пенопласта предлагаем учесть в новой редакции STR 2.01.03:1999 „Декларируемые и проектные величины теплотехнических показателей строительных материалов и изделий“.

#### 5. ВЫВОДЫ

1. Экспериментально определены коэффициенты теплопроводности влажных образцов пенополистирольных плит, изготавливаемых литовскими производителями с применением различных сырьевых материалов.

На основании экспериментальных результатов увеличение коэффициента теплопроводности полистирольного пенопласта в зависимости от его массового влагосодержания аппроксимировано регрессионным уравнением (2), а в зависимости от объемного влагосодержания – уравнением (3).

2. Для оценки влияния влажности на коэффициент теплопроводности пенополистирольных плит в ISO 10456 рекомендована зависимость (4), которая идентична и для минераловатных, стекловолоконистых изделий и, по нашему мнению, практически не учитывает различий в структуре полимерных и неорганических волоконистых материалов. Выполненные исследования и анализ результатов, приведенных в опубликованных работах, не позволяют применять в расчетах эту зависимость без доли опасения.

3. На основании экспериментальных результатов и представленных сведений о расчетном массовом влагосодержании полистирольного пенопласта в ограждающих конструкциях предложена величина поправки коэффициента теплопроводности  $\Delta\lambda_w$ , W/(m · K), учитывающей дополнительное увлажнение пенопласта в невентилируемых ограждениях, для плит плотностью до 17 кг/м<sup>3</sup> равная 0,004, а выше 17 кг/м<sup>3</sup> – 0,003 W/(m · K). Полученные величины поправок  $\Delta\lambda_w$ , W/(m · K), рекомендуется учесть в новой редакции STR 2.01.03:1999.

Поступило  
18 03 2002

#### Литература

- ГОСТ 7076-87. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности. Москва: Изд-во стандартов, 1987. 12 с.
- Доннер М. С., Масленников Л. А. Теплопроводность пенопласта ФРП-1 в зависимости от ув-

- лажнения и температуры // Производство, свойства и применение теплоизоляционных изделий и конструкций. Сб. трудов ВНИПИТеплопроект. Москва, 1977. Вып. 46. С. 37–46.
3. LST 1583: 1999. Statybinės termoizoliacinės medžiagos. Polistireninio putplasčio gaminiai. Techniniai reikalavimai. 20 p.
  4. Петров-Денисов В. Г., Масленников Л. А. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 192 с.
  5. Айвазян С. А. Статистическое исследование зависимостей. Применение методов корреляционного и регрессионного анализов и обработка результатов эксперимента. Москва: Металлургия, 1968. 228 с.
  6. Sakalauskas V. Statistika su Statistica. Vilnius, 1998. 228 p.
  7. Айвазян С. А., Тамарин А. А. Методика нахождения тарировочных зависимостей для косвенного контроля технологических параметров изготовления железобетонных изделий и их конструктивных характеристик // Неразрушающие методы контроля качества железобетонных конструкций. Москва: Стройиздат, 1972. С. 58–76.
  8. Доннер М. С. О свойствах низкотемпературных теплоизоляторов // Производство, свойства и применение теплоизоляционных изделий и конструкций. Москва, 1970. Вып. 14. С. 33–45.
  9. Тимошенко А. Т. Исследование теплофизических характеристик полимерных теплоизоляционных материалов // Математическое моделирование и экспериментальное исследование процессов тепло- и массопереноса. Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1979. С. 114–119.
  10. Gösele K., Schüle W. Schall, Wärme, Feuchte: Grundlagen, Erfahrungen u. prakt. Hinweise für den Hochbau. Aufl.–Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 1979. 328 S.
  11. Павлов В. А. Пенополистирол. Москва: Химия, 1973. 240 с.
  12. ISO 10456:1997(E). Thermal Insulation. Building Materials and Products – Determination of Declared and Design Thermal Values. 18 p.
  13. Лыков А. В. Теория сушки. Москва: Энергия, 1968. 472 с.
  14. Лыков А. В. Тепломассообмен / Справочник. Москва: Энергия, 1978. 480 с.
  15. Желудкова Е. А., Оборин Л. А. К исследованию теплозащитных свойств пенопластовой изоляции подземных теплопроводов // Изв. вузов „Строительство и архитектура“. 1978. № 7. С. 134–137.
  16. Кауфман Б. Н. Теплопроводность строительных материалов. Москва: Стройиздат, 1955. 160 с.
  17. STR 2.01.03:1999. Statybinių medžiagų ir gaminių šiluminių techninių dydžių deklaruojamosios ir projektinės vertės. Vilnius: Rekona, 1999. 26 p.
  18. STR 2.05.01:1999. Pastatų atitvarų šiluminė technika. Vilnius: Rekona, 1999. 134 p.
  19. Колотилкин Б. М. Надежность функционирования жилых зданий. Москва: Стройиздат, 1989. 376 с.

Ivan Gnip, Vladislovas Keršulis, Sigitas Vėjelis

### POLISTIRENINIO PUTPLASČIO PLOKŠČIŲ ŠILUMOS LAIDUMO PRIKLAUSOMYBĖ NUO DRĖGNIO

#### S a n t r a u k a

Darbe pateikta drėgnų polistireninio putplasčio plokščių šilumos laidumo koeficientų matavimo metodika ir eksperimentų rezultatai. Visi rezultatai aproksimuoti regresinėmis lygtimis bei palyginti su literatūros duomenimis. Parodyta, kad skaičiuojant šių gaminių šilumos laidumo koeficientų projektines vertes, atitinkamos pataisos dėl medžiagos įdrėkio konstrukcijoje gali būti sumažintos.

**Raktažodžiai:** šilumos laidumo koeficientas, drėgnio įtaka, šilumos laidumo koeficiento pataisa dėl įdrėkio, polistireninis putplastis

Ivan Gnip, Vladislovas Keršulis, Sigitas Vėjelis

### DEPENDENCE OF THERMAL CONDUCTIVITY OF EXPANDED POLYSTYRENE BORDS ON MOISTURE CONTENT

#### S u m m a r y

The technique for thermal conductivity measurements of moisten expanded polystyrene boards as well as corresponding experimental results are presented. All results have been approximated by regression equations and discussed in relation to corresponding literature data. The possibility is shown for reducing thermal conductivity correction, which is used for determination of corresponding design values and is stipulated by material moisture content.

**Key words:** thermal conductivity, moisture influence, thermal conductivity correction for moisture content, expanded polystyrene