

Исследование вклада лучистого теплообмена в эффективную теплопроводность пенополиуретана

*О.В. Соловьева¹, С.А. Соловьев¹, Р.З. Шакурова¹, Е.С. Каленова¹,
А.С. Шубина²*

¹Казанский государственный энергетический университет

*²Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А. Н. Туполева — КАИ*

Аннотация: Проведены экспериментальные исследования эффективной теплопроводности полиуретановых пен с различными структурными параметрами, такими как тип ячеек и их размер. Цель работы – определение вклада лучистого теплообмена в эффективную теплопроводность полиуретановых пен. Исследования проведены с использованием измерителя теплопроводности «ИТП-МГ4» в двух вариантах: в первом случае измерили эффективную теплопроводность пенополиуретана без слоя фольги, во втором случае со слоем фольги. Результаты экспериментов показали, что в зависимости от морфологии пены вклад лучистого теплообмена в эффективную теплопроводность составляет от 5,88% до 15,87%.

Ключевые слова: ячеистые материалы, теплоизоляция, вспененный полиуретан, эффективная теплопроводность, излучение, морфология

Введение

В настоящее время ячеистые материалы являются наиболее предпочтительными для применения в качестве тепловой изоляции благодаря низкой теплопроводности, простоте и низкой стоимости изготовления [1]. Одним из наиболее популярных ячеистых теплоизоляторов является вспененный полиуретан [2].

Основной характеристикой тепловой изоляции является теплопроводность, которая характеризует способность материала проводить тепло. Необходимо отметить, что поскольку речь идёт о пористых материалах, корректно использовать термин «эффективная теплопроводность», говоря о теплопроводности исследуемых полиуретановых пен. Эффективная теплопроводность (λ_t) [3] складывается из теплопроводности твердотельной матрицы (λ_s), теплопроводности газа,

находящегося внутри ячеек (λ_g), переноса тепла путем конвекции внутри ячеек (λ_c) и переноса тепла путем излучения (λ_r) (1):

$$\lambda_t = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_c + \lambda_r, \quad (1)$$

На эффективную теплопроводность материала влияют различные факторы, такие как плотность [4], влажность [5] и структурные параметры [6, 7]. Исследованиям факторов, влияющих на тепловые свойства ячеистых материалов посвящены работы [8, 9]. Так, в работе [3] авторы исследовали влияние морфологии полиуретановой пены на значение эффективной теплопроводности, а также оценили вклад конвекции.

Целью данной работы является оценка вклада лучистого теплообмена в эффективную теплопроводность полиуретановых пен с различной морфологией.

Постановка задачи и метод решения

Проведены исследования вклада лучистого теплообмена на эффективную теплопроводность полиуретановых пен. Измерения проводили с использованием измерителя теплопроводности «ИТП-МГ4» (рисунок 1) в условиях стационарного теплового режима.

Измеритель «ИТП-МГ4» состоит из нагревателя-преобразователя, выполненного в виде стационарной герметичной установки, и электронного блока. Принцип работы прибора заключается в создании стационарного теплового потока, проходящего через исследуемый образец перпендикулярно лицевым граням образца, в измерении плотности теплового потока и температур противоположных лицевых граней образца.

Поскольку в стационарной установке нижняя плита выполняет роль холодильника, верхняя – нагревателя, то тепловой поток направлен вертикально вниз через исследуемый образец, таким образом исключается возникновение конвективных потоков. Следовательно, влияние

конвективной составляющей (λ_c) эффективной теплопроводности отсутствует.



а)



б)

Рис. 1. – Измеритель теплопроводности «ИТП-МГ4» с исследуемым образцом полиуретановой пены: нагреватель-преобразователь (а) и электронный блок (б).

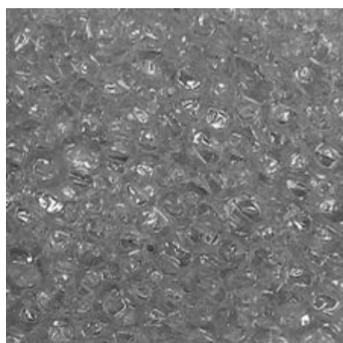
Для определения вклада лучистого теплообмена (λ_r) в эффективную теплопроводность полиуретановой пены проводились измерения образцов пены без фольги и с фольгой, размещенной дополнительным слоем в исследуемом образце. Исследования проведены на полиуретановых пенах с различными структурными параметрами, такими как тип ячеек и их размер. Параметры исследуемых пен представлены в таблице 1.

Таблица № 11

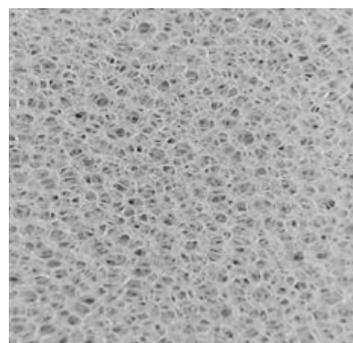
Параметры исследуемых полиуретановых пен

Обозначение исследуемого образца	Тип ячеек	Средний размер ячеек d , мм	Толщина губки δ , мм
А	Закрытые	6,28	50
В	Открытые	3,1	45
С	Открытые	0,725	50
Д	Смешанные	3,28	50
Е	Смешанные	3,4	45
Ф	Закрытые ячейки (d_1) Сквозные отверстия (d_2)	$d_1=0,7$ $d_2=2,523$	50

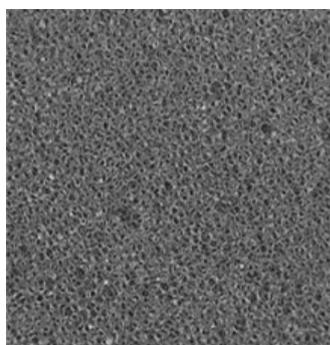
Фотографии образцов представлены на рисунке 2.



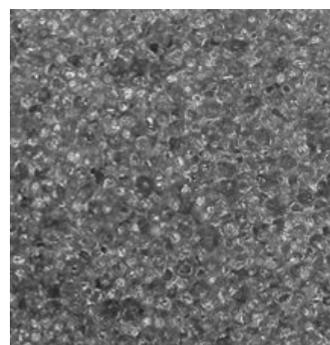
A)



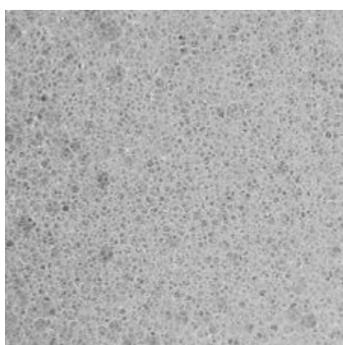
B)



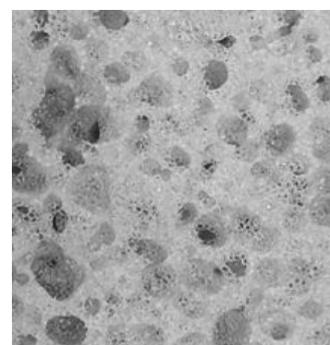
C)



D)



E)



F)

Рис. 2. – Фотографии исследуемых полиуретановых пен.

Измерения эффективной теплопроводности проводили следующим образом: исследуемый образец помещали в стационарную установку, закрывали установку на эксцентриковый замок, на электронном блоке задавали температуры холодильника ($t_x=15\text{ }^{\circ}\text{C}$) и нагревателя ($t_n=35\text{ }^{\circ}\text{C}$), а также толщину образца (H , мм), запускали установку. Далее программное устройство автоматически управляет панелями холодильника и нагревателя,

поддерживая заданные температуры до тех пор, пока тепловой поток не стабилизируется, после чего проводятся автоматические вычисления значения эффективной теплопроводности и запись результатов в архив. Измерения проводились в двух вариантах: без слоя фольги и с фольгой, размещенной в исследуемом образце.

Результаты и обсуждение

По результатам измерений эффективной теплопроводности полиуретановых пен без слоя фольги построен график, представленный на рисунке 3. Поскольку исследованные образцы пенополиуретана имеют разную структуру, значения эффективной теплопроводности образцов разнятся. Так, пена с маленькими открытыми ячейками $d=0,725$ мм (образец С) имеет самое низкое значение эффективной теплопроводности $0,051$ Вт/(м·К). Образец В, который также имеет открытые ячейки, но большего размера $d=3,1$ мм, показал более высокое значение эффективной теплопроводности $0,068$ Вт/(м·К).

Самую высокую эффективную теплопроводность имеет образец А с крупными ячейками закрытого типа $d=6,28$ мм, это объясняется тем, что ячейки пены достаточно крупные, чтобы внутри них возникли конвективные потоки, усиливающие теплообмен. Согласно результатам работы [10], конвективные потоки возникают в пенах с закрытыми ячейками диаметром более 4 мм.

Пены со смешанными ячейками (образцы D, E и F) продемонстрировали близкие показатели эффективной теплопроводности, которые зависят от размера ячеек и соотношения объёмов закрытых и открытых ячеек.

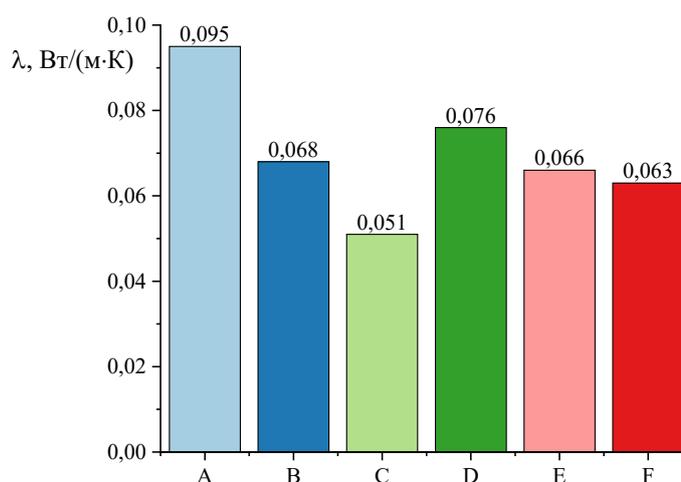


Рис. 3. – Результаты измерения эффективной теплопроводности полиуретановых пен без фольги.

По результатам измерений эффективной теплопроводности полиуретановых пен со слоем фольги построен график, представленный на рисунке 4. Как видно из графика, значения эффективной теплопроводности полиуретановых пен снизились с добавлением слоя фольги, что объясняется снижением вклада лучистого теплообмена в эффективную теплопроводность. На рисунке 5 представлен график, демонстрирующий в процентном соотношении разницу в значениях эффективной теплопроводности полиуретановых пен, измеренных с фольгой и без неё. Так, в пене В выявлен наименьший вклад лучистого теплообмена в эффективную теплопроводность, равный 5,88%. В закрытоячеистой пене А вклад лучистого теплообмена составил 9,47%, в пенах D и E вклад составил 13,16% и 13,64% соответственно, что объясняется схожей морфологией образцов D и E. Образец F самый высокий вклад лучистого теплообмена в значение эффективной теплопроводности продемонстрировал 15,87% со структурой, имеющей маленькие закрытые ячейки и крупные сквозные отверстия.

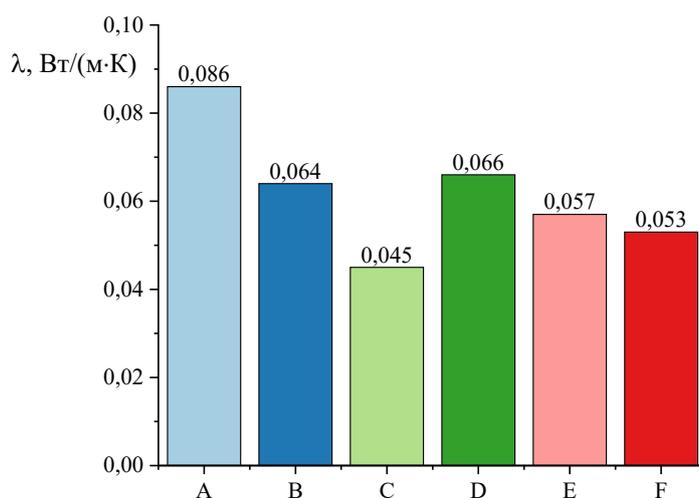


Рис. 4. – Результаты измерения эффективной теплопроводности полиуретановых пен с фольгой.

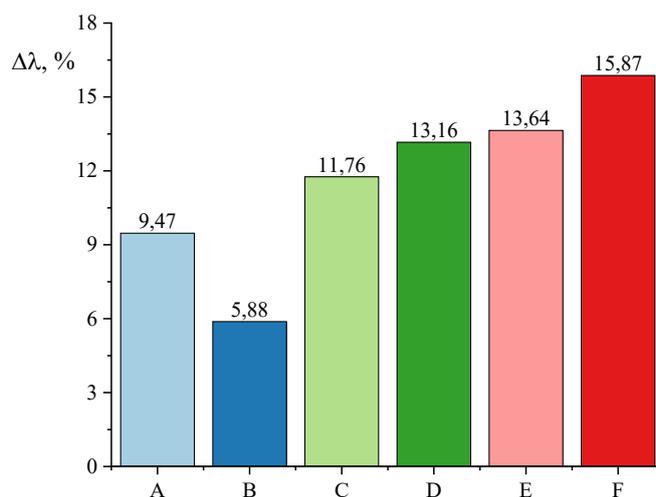


Рис. 5. – Вклад лучистого теплообмена (%) в эффективную теплопроводность полиуретановых пен.

Выводы

Проведены экспериментальные исследования вклада лучистого теплообмена в значение эффективной теплопроводности полиуретановых пен с различной морфологией. Исследуемые образцы имели различную структуру, а именно тип ячеек (открытые/закрытые/смешанные) и их размер (от 0,7 до 6,28 мм). Исследования проведены в измерителе теплопроводности «ИТП-МГ4» при температурах нагревателя $t_{\text{н}}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ и холодильника $t_{\text{х}}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты исследований показали, что лучистый теплообмен вносит вклад в эффективную теплопроводность полиуретановых пен в размере 5,88%-15,87%, в зависимости от структурных параметров пены. Так, наибольший вклад лучистого теплообмена 15,87% зафиксирован у пены F, характеризующейся наличием крупных сквозных отверстий $d_2=2,523$ мм и маленьких закрытых ячеек $d_1=0,7$ мм. Наименьший вклад лучистого теплообмена зафиксирован у пены B с крупными ячейками $d=3,1$ мм открытого типа. Производителям пенополиуретановой теплоизоляции рекомендуется добавлять фольгированный слой для нивелирования вклада лучистого теплообмена.

Литература

1. Hasanzadeh R., Azdast T., Lee P.C., Park C.B. A review of the state-of-the-art on thermal insulation performance of polymeric foams // Thermal Science and Engineering Progress. 2023. V. 41. P. 101808.
2. Wang Z., Wang C., Gao Y., Li Z., Shang Y., Li H. Porous thermal insulation polyurethane foam materials // Polymers. 2023. V. 15. №. 18. P. 3818.
3. Soloveva O.V., Solovev S.A., Vankov Y.V., Shakurova R.Z. Experimental studies of the effective thermal conductivity of polyurethane foams with different morphologies // Processes. 2022. V. 10. №. 11. P. 2257.
4. Fu Y., Qiu C., Ni L., Ye H., Zou H., Luo Y., Liang M. Cell structure control and performance of rigid polyurethane foam with lightweight, good mechanical, thermal insulation and sound insulation // Construction and Building Materials. 2024. V. 447. P. 138068.
5. Pásztor Z. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials // Journal of Building Engineering. 2021. V. 44. P. 102604.
6. Brondi C., Maio E.D., Bertucelli L., Parenti V., Mosciatti T. The effect of organofluorine additives on the morphology, thermal conductivity and mechanical

properties of rigid polyurethane and polyisocyanurate foams // *Journal of Cellular Plastics*. 2022. V. 58. №. 1. P. 121-137.

7. Hermama C., Bensiali B., Lahbabi S., El Maliki A. Effect of the shape and the distribution of cells on the effective thermal conductivity of polyurethane foam // *Polymer Engineering & Science*. 2023. V. 63. №. 7. P. 2278-2294.

8. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З., Дудалова Е.А., Зайнуллина Э.Р. Математическое моделирование теплообмена и гидродинамики в моделях керамических сотовых теплообменников // *Инженерный вестник Дона*, 2024, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9055.

9. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З., Голубев Я.П. Расчет формирования осадка в пористом теплообменнике и оценка влияния осадка на тепловой поток // *Инженерный вестник Дона*, 2024, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9232.

10. Alvarez-Lainez M., Rodriguez-Perez M. A., De Saja J. A. Thermal conductivity of open-cell polyolefin foams // *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 2008. V. 46. №. 2. P. 212-221.

References

1. Hasanzadeh R., Azdast T., Lee P.C., Park C.B. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023. V. 41. pp. 101808.

2. Wang Z., Wang C., Gao Y., Li Z., Shang Y., Li H. *Polymers*. 2023. V. 15. №. 18. pp. 3818.

3. Soloveva O.V., Solovev S.A., Vankov Y.V., Shakurova R.Z. *Processes*. 2022. V. 10. №. 11. pp. 2257.

4. Fu Y., Qiu C., Ni L., Ye H., Zou H., Luo Y., Liang M. *Construction and Building Materials*. 2024. V. 447. pp. 138068.

5. Pásztor Z. *Journal of Building Engineering*. 2021. V. 44. p. 102604.



6. Brondi C., Maio E.D., Bertucelli L., Parenti V., Mosciatti T. Journal of Cellular Plastics. 2022. V. 58. №. 1. pp. 121-137.
7. Hermama C., Bensiali B., Lahbabi S., El Maliki A. Polymer Engineering & Science. 2023. V. 63. №. 7. pp. 2278-2294.
8. Soloveva O.V., Solovev S.A., Shakurova R.Z., Dudalova E.A., Zajnullina E.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9055.
9. Soloveva O.V., Solovev S.A., Shakurova R.Z., Golubev Ya.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9232.
10. Alvarez-Lainez M., Rodriguez-Perez M. A., De Saja J. A. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. 2008. V. 46. №. 2. pp. 212-221.

Дата поступления: 14.02.2025

Дата публикации: 15.03.2025