

## ВЫБОР СИСТЕМЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ОТГРУЗКИ СПГ ПРИ АВТОНОМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ПРИБРЕЖНЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

*Иванов Л.В., Анохин А.В., Зайцев А.В.  
Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** автономная газификация СПГ, полимеры, теплоизоляция, коэффициент теплопроводности.

**Аннотация.** В работе рассматриваются варианты теплоизоляционных систем, применяемых для хранилищ сжиженного природного газа (СПГ) и отгрузочных (бункеровочных) трубопроводов. Сравнению подвергаются различные минеральные и полимерные синтетические теплоизоляционные материалы. Оценка свойств гидрофобности и теплопроводности изоляционных материалов позволяет выделить наиболее оптимальный из вариантов.

## CHOOSING A THERMAL INSULATION SYSTEM FOR STORING AND SHIPPING LNG DURING AUTONOMOUS GASIFICATION OF COASTAL SETTLEMENTS

*Ivanov L.V., Anokhin A.V., Zaitsev A.V.  
ITMO University, Saint-Petersburg*

**Keywords:** autonomous gasification of LNG, polymers, thermal insulation, thermal conductivity coefficient.

**Abstract.** The paper discusses options for thermal insulation systems used for storage of liquefied natural gas (LNG) and shipping (bunkering) pipelines. Various mineral and polymer synthetic heat-insulating materials are compared. Evaluation of the hydrophobicity and thermal conductivity properties of insulating materials allows us to identify the most optimal of the options.

Сжиженный природный газ выделяют в качестве отдельного вида топлива из-за специфических ограничений в транспорте и хранении. Данные осложнения обусловлены, в первую очередь, испаряемостью продукта и отражающим это показателем BOR (boil-off rate). Испарение продукта означает прямые потери.

Транспорт и хранение больших объёмов СПГ обычно сопровождается применением установок повторного сжижения газа (УПСГ) для снижения потерь топлива. Для небольших объёмов использование данных установок нерентабельно. В таком случае, наиболее распространённые показатели BOR в 0,15%/день могут привести к потере больших объёмов топлива при низком темпе потребления. Процессы бункеровки точно так же сопровождаются данными издержками (%/день). Сокращения объёмов отпарного газа можно достичь, применяя оптимальные теплоизоляционные материалы.

Существует огромное количество теплоизоляционных систем, исполняемых применительно к типовым системам хранения груза. Помимо разницы геометрических параметров, типов стыковки изоляционных панелей основные отличия систем кроются в толщине, плотности, а главное – показателе теплопроводности используемых материалов.

Среди традиционно используемых материалов изоляции можно выделить такие как перлит, стекловату, минеральную вату, пробковое дерево и многие другие. Производство полимерных изоляционных материалов позволило существенно повысить энергоэффективность изоляционных систем. Далее произведено сравнение наиболее часто используемых видов изоляции.

Перлит представляет собой аморфное вулканическое стекло с относительно высоким содержанием воды, которое обычно образуется в результате гидратации обсидиана. Много лет используется в качестве изоляционного материала благодаря свойству значительно расширяться при достаточном нагревании. Появление современных теплоизоляционных материалов с лучшими свойствами понизило его частоту использования, поэтому чаще он используется в комбинации с иными изоляционными системами, например, с вакуумом.

Пенополистирол – синтетический ароматический углеводородный полимер, изготовленный из мономера стирола. Данный материал имеет расширенные открытые ячейки, заполняемые газом. Экструдированный пенополистирол имеет структуру закрытых ячеек, что практически исключает возможность поглощения влаги. Закрытая структура ячеек позволяет получить улучшенную шероховатость поверхности, высокую жесткость и меньшую теплопроводность.

Пеностекло так же относится к пористым пенопластовым материалам. Его изготавливают путём нагрева смеси мелко разбитого/гранулированного стекла и вспенивающего агента (углерод, известняк и др.). Вблизи точки плавления стекла вспенивающий агент выделяет газ, создавая пористую структуру. После охлаждения смесь затвердевает в жесткий материал с заполненными газом закрытыми ячейками, составляющими большую часть ее объема.

Стекловата – это изолирующий материал, изготовленный из стекловолокна, упорядоченный в текстуру, похожую на шерсть. Процесс изготовления задерживает много маленьких воздушных карманов между стеклами, которые обеспечивают высокие теплоизоляционные свойства.

Поливинилхлорид получают суспензионной или эмульсионной полимеризацией винилхлорида. Полученная суспензия ПВХ дегазируется и десорбируется для удаления избытка ВХ, который используется повторно. Затем полимер пропускают через центрифугу для удаления воды. Суспензию дополнительно сушат в слое горячего воздуха, и полученный порошок просеивают перед хранением или гранулированием.

Полиуретан – полимерный изоляционный материал, производимый при взаимодействии полиолов и диизоцианатов, получаемых из сырой нефти. Процесс отверждения происходит при реакции воды с избытком изоцианата с образованием амина и диоксида углерода, что и вспенивает материал. Продувание полиуретана пентаном или разновидностями хлорфторуглеродного ряда (HFC), такими как R-245fa-e, с добавлением перфторалкоксилкана существенно понижают его коэффициента теплопроводности.

Полиизоцианурат – термореактивный полимер с закрытыми ячейками. Этот материал по свойствам похож на пенополиуретан с высокой плотностью, но образуется при помощи других катализаторов. Использование при его изготовлении разновидностей пентана в качестве пенообразователя улучшает

теплоизоляционные свойства по сравнению со многими известными используемыми материалами.

Сравнение перечисленных теплоизоляционных материалов представлено в таблице 1.

Табл. 1. Сравнение параметров теплоизоляционных материалов

Материал	Теплопроводность, $\frac{Вт}{м \cdot К}$	Плотность, $м^3/кг$	Поглощение воды, %
Перлит	0,047	130	0,5
Вакуум+Перлит	0,1	130 (наполнитель)	0,5
Пенополистирол	0,04	79	30
Пеностекло	0,037	30	2
Стекловата	0,03-0,04	10-75	4
Поливинилхлорид	0,031	30-70	1
Экструдированный пенополистирол	0,025-0,04	28-45	0,4
Жёсткая полиуретановая пена	0,020 - 0,022	30-40	1,5
Полиуретановая пена, HFC-245fa-e	0,0147	40-250	0,5-1
Полиизоцианурат	0,011	30	0,47%

Исходя из сравнительных данных [5], тенденции развития пенообразующих агентов в структурах полимерных материалов, приводит к существенному повышению теплоизолирующих свойств. Полимерные пенные материалы имеют преимущества в теплоизоляционных свойствах, что уменьшает общий вес и толщину конструкции.

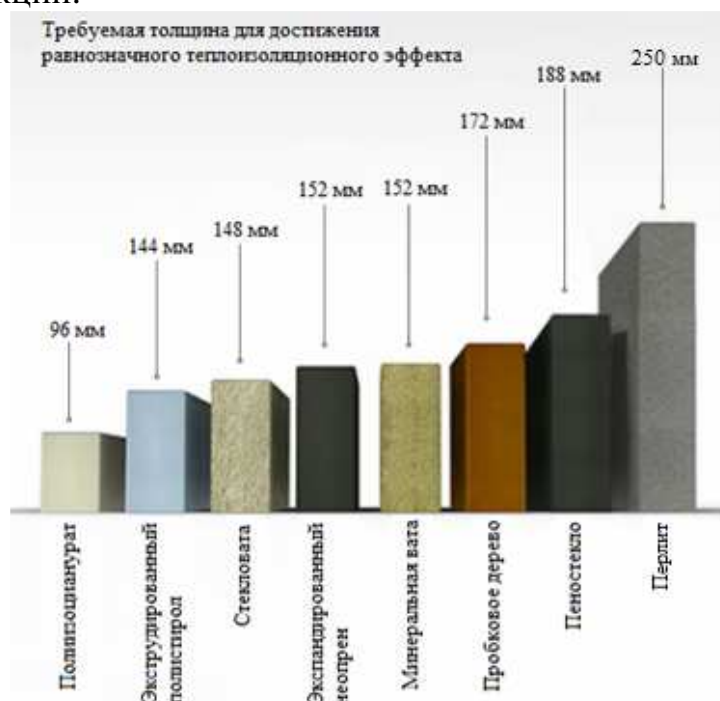


Рис. 1. Сопоставление толщины с теплоизоляционными свойствами [5]

Жесткие виды изоляционных пен с течением времени теряют небольшое количество изолирующей способности, потому что атмосферный воздух вытесняет газы, использованные в качестве пенообразователей. Более мелкая закрытая структура препятствует диффузии газов через границы ячеек, что снижает потерю работоспособности материала и увеличивает срок службы теплоизоляционной конструкции.

### **Заключение**

Производство полимеров с закрытой ячеистой структурой позволило полимерным теплоизоляционным материалам обойти использовавшиеся ранее перлит, стекловолокно, минеральную вату и др. Применение новых пенообразующих агентов понизило теплопроводность данных материалов, теперь они практически не уступают вакуумным типам изоляции по энергоэффективности. Также теплоизоляционные системы на основе полимеров гораздо дешевле вакуумных систем. Они просты в производстве, достаточно надежны в эксплуатации. Из проведенного сравнения, наиболее оптимальным вариантом изоляции являются полиизоцианурат и полиуретановая пена с применением R245fa-e.

### **Список литературы**

1. Thermal study on LNG tank / Li Rong, Jin Wenbing, Zhang Juyoung / [Электронный ресурс] // School of Mechanical Engineering. URL: [https://www.academia.edu/27849086/Thermal\\_Study\\_on\\_LNG\\_Cargo\\_Tank](https://www.academia.edu/27849086/Thermal_Study_on_LNG_Cargo_Tank).
2. Calculation of boil-off gas (BOG) generation of KC-1 membrane LNG tank with high density rigid polyurethane foam by numerical analysis / Hyeonwon JeongW, Jaewoo Shim / [Электронный ресурс] // Department of Chemical Engineering, 2017. URL: [https://www.researchgate.net/publication/316069484\\_Calculation\\_of\\_Boil-Off\\_Gas\\_BOG\\_Generation\\_of\\_KC-1\\_Membrane\\_LNG\\_Tank\\_with\\_High\\_Density\\_Rigid\\_Polyurethane\\_Foam\\_by\\_Numerical\\_Analysis/fulltext/58ef0fe8aca2724f0a28ca16/Calculation-of-Boil-Off-Gas-BOG-Generation-of-KC-1-Membrane-LNG-Tank-with-High-Density-Rigid-Polyurethane-Foam-by-Numerical-Analysis.pdf](https://www.researchgate.net/publication/316069484_Calculation_of_Boil-Off_Gas_BOG_Generation_of_KC-1_Membrane_LNG_Tank_with_High_Density_Rigid_Polyurethane_Foam_by_Numerical_Analysis/fulltext/58ef0fe8aca2724f0a28ca16/Calculation-of-Boil-Off-Gas-BOG-Generation-of-KC-1-Membrane-LNG-Tank-with-High-Density-Rigid-Polyurethane-Foam-by-Numerical-Analysis.pdf).
3. ISO-C1/2.0 Polyisocyanurate Insulation 2.0 lb/ft<sup>3</sup> (32.1 kg/m<sup>3</sup>) Density Foam: [Электронный ресурс] // Dyplast. 2019. URL: <http://insultherm.com/wp-content/uploads/2016/09/ISO-C1-2.0-Data-Sheet.pdf>.
4. Thermal insulation materials, technical characteristics and selection criteria : [Электронный ресурс] // URL: <http://www.fao.org/3/y5013e/y5013e08.htm>
5. DUNA products for industrial insulation, Hot, Cold and Cryogenic: [Электронный ресурс] // Duna-Corradini. URL: <https://www.dunagroup.com/media/cms/corafoam-special-foams-3801/depliant-criogenico.pdf>

### **Сведения об авторах:**

*Иванов Лев Владимирович* – студент магистратуры Университета ИТМО, г.Санкт-Петербург;

*Анохин Андрей Владимирович* – студент магистратуры Университета ИТМО, г.Санкт-Петербург;

*Зайцев Андрей Викторович* – к.т.н., доцент Университета ИТМО, г.Санкт-Петербург.