

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В КРИОГЕННОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ С САМОВАКУУМИРОВАНИЕМ ТРУБОПРОВОДА ЗАПРАВКИ СЖИЖЕННЫМ ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ

И.В. Наумчик¹, Р.О. Лашко¹, Н.А. Мохначев¹

Научный руководитель - к. т. н., доцент И.В. Наумчик

¹ – Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского»

Введение

Теплозащитные свойства криогенной теплоизоляции характеризуются величиной удельных теплопритоков. Эта величина связана с механизмом теплопередачи в порошково-вакуумной теплоизоляции (ПВИ), который носит сложный характер. Моделирование теплопереноса основано на использовании модели сплошной среды, в которой различные механизмы теплопереноса сведены к эффективной теплопроводности. Показателем качества в этом случае является коэффициент эффективной теплопроводности.

Существующие модели теплопереноса не учитывают изменение коэффициента эффективной теплопроводности ПВИ с самовакуумированием трубопровода заправки сжиженным природным газом [1]. В данном разделе предложена модель теплопереноса в изоляции, комплексный механизм изменения ее свойств, модели изменения коэффициента эффективной теплопроводности за счет внутренних и внешних факторов.

Решению данной актуальной задачи посвящена настоящая работа.

Основная часть

Разработана математическая модель теплопереноса в ПВИ, учитывающая изменение коэффициента эффективной теплопроводности теплоизоляции в результате ее самовакуумирования при использовании в качестве газа-наполнителя углекислого газа. Анализ многочисленных теоретических исследований и большого числа экспериментальных данных позволяет в общем случае выявить следующие качественные закономерности переноса теплоты в капиллярно-пористых телах и дисперсных средах [1-6]:

1. Теплопроводность материала частиц не оказывает решающего влияния на эффективную теплопроводность дисперсного материала, и ее роль, особенно для неметаллических материалов, достаточно мала.

2. Эффективная теплопроводность капиллярно-пористых и дисперсных материалов сильно зависит от теплопроводности газа-наполнителя.

3. Значительное влияние на эффективную теплопроводность материала оказывает теплопроводность газового микрозазора между частицами дисперсного материала.

4. Контактная теплопроводность между частицами играет большую роль и является определяющей при невысоких температурах и низком давлении газа; при нормальном давлении ею можно пренебречь.

5. Эффективная теплопроводность капиллярно-пористых и дисперсных материалов начинает зависеть от давления газа-наполнителя при определенных значениях числа Кнудсена.

6. При глубоком вакууме эффективная теплопроводность дисперсного материала при повышенных температурах почти полностью обусловлена лучистым теплообменом; в условиях высоких температур лучистая составляющая теплопроводности является определяющей при любых давлениях газа-наполнителя.

7. Конвективным переносом теплоты в дисперсной или капиллярно-пористой системе в подавляющем большинстве случаев можно пренебречь, так как очень малые размеры пор и микрозазоров на стыке частиц препятствуют возникновению конвективных токов под действием температурного градиента. Известно, что конвективным теплообменом в порах можно пренебречь при величинах $GrPr < 10^3$, что справедливо для частиц диаметром не более 4–6 мм. Большинство реальных дисперсных систем имеет размер частиц меньше указанного.

Выводы

Предложена уточненная физическая модель теплопереноса в ПВИ, отличающаяся комплексным учетом как внутренних, так и внешних факторов. Впервые в качестве основного внутреннего фактора, определяющего коэффициент эффективной теплопроводности, рассмотрено самовакуумирование теплоизоляции. Такой подход стал возможен в результате применения азотного экрана в составе теплоизоляции трубопровода заправки сжиженным природным газом и углекислоты в качестве газо-наполнителя ПВИ, которая кристаллизуется на поверхности экрана, создавая при этом необходимое разряжение.

Аналитические выражения, включенные в модель, позволяют в явном виде оценить зависимость значений всех составляющих эффективной теплопроводности от времени при действии внутренних и внешних факторов.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными других авторов и натурными исследованиями показало, что отличия составляют не более 12 %.

Литература

1. Друзякин И.Г. Управление агрегатным состоянием жидкой углекислоты в технологических трубопроводах: дис. канд. тех. наук. – Пермь, 2004. – 138 с.
2. Баранов А.Ю., Соколова Е.В. Хранение и транспортировка криогенных жидкостей. Часть 1: Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 95 с.
3. Владимиров А.Е., Иванцов О.М. Стационарные и переходные режимы трубопроводов сжиженного природного газа // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1981. № 6. – С. 105-114.
4. Полозов А.Е., Жмакин В.А. Преодоление двухфазности течения транспортируемого сжиженного природного газа по трубопроводу // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2005. № 12. – С. 58-61.
5. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent. Учеб. пособие/ О.В. Батурин, Н.В. Батурин, В.Н. Матвеев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 151 с.
6. Криогенные системы. Том 2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем. Под общей редакцией А.М. Архарова и А.И. Смородина. – М.: Машиностроение, 1999. – 720 с.