

УДК 691; 669.37; 669...7

Многослойная вакуумная суперизоляция

Д-р техн. наук, профессор **Баранов И.В.** baranov@mail.ifmo.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Вишнякова Е.В. evishnyakova@corp.ifmo.ru

ОАО «Светлана»

194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, д. 27

Ископаемые виды топлива являются основными и наиболее важными источниками энергии в современном мире. Наиболее популярным из них является нефть, используемая для выработки тепловой энергии для приготовления пищи и освещения в начале девятнадцатого века. Сегодня она используется в основном в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания и обеспечивает мобильность самолетов, автомобилей, поездов, грузовиков и морского транспорта. Но при их сжигании эти виды топлива производятся углекислый газ и другие, вредные для окружающей среды продукты. Следовательно, должны быть разработаны альтернативные источники энергии, которые будут экономически эффективными и обеспечат современный мир достаточной энергией без дальнейшего повышения уровня углекислого газа. Полагают, что водород может быть использован как альтернативный энергоноситель для использования в двигателях внутреннего сгорания. Для хранения жидкого криогенного водорода требуются очень сложные изоляционные материалы, необходимые для устранения выкипания водорода. Считается, что наиболее эффективный тепловой барьер для криогенного применения это слоистый композитный изоляционный материал, действующий в условиях высокого вакуума. Многослойная изоляция является отраслевым стандартом для изоляции криогенных контейнеров. Этот композитный изоляционный материал защищает от выкипания и утечек гораздо лучше, чем обычная изоляция.

Ключевые слова: многослойный, вакуумная изоляция, суперизоляция, криогенный, хранение водорода.

DOI:10.17586/2310-1148-2016-9-3-36-47

Multi-layered vacuum superinsulation

D.Sc. **Baranov I.V.** baranov@mail.ifmo.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

Vishnyakova E.V. evishnyakova@corp.ifmo.ru

«Svetlana OAO» (Open Joint-stock Company)

194156, Russia, St. Petersburg, Engelsa Ave., 27

Fossil fuels are the modern world's primary and most important energy source. The main type of which is oil, used to generate heat for cooking and lighting applications during the beginning of the nineteenth century. Today, it is mostly used as a fuel for internal combustion engines and provides mobility for planes, cars, trains, trucks and boats. But by burning these fuels, carbon dioxide and other products that are harmful to the environment are being produced. Consequently alternative energy sources have to be developed that are cost effective and need to fill the modern world's energy requirements without further increasing carbon dioxide levels. It is believed that hydrogen can be used as an alternative energy carrier for the use in internal combustion engines in order to alleviate the problem. In order to store liquid hydrogen cryogenically, very sophisticated insulation materials and configurations are required to mitigate hydrogen boil-off. It is believed that the most effective heat barrier for cryogenic applications is layered composite insulation material operating in high vacuum. It is claimed that for cryogenic applications MLVSI is the industry standard for insulating cryogenic containers. This composite insulation material shows much better boil-off results than conventional insulation.

Keywords: multi-layer, vacuum insulation, super insulation, cryogenic, hydrogen storage.

Ископаемые виды топлива состоят из углерода и атомов водорода, а при их сжигании производятся углекислый газ и другие, вредные для окружающей среды продукты. Ученые считают количество ископаемого топлива, которые уже было сожжено произвело достаточно углекислого газа, чтобы обеспечить стремительное изменение климата, и что в 2060 году мир будет потреблять в три раза больше энергии на сегодня [1].

Следовательно, должны быть разработаны альтернативные источники энергии, которые будут экономически эффективными и обеспечат современный мир достаточной энергией без дальнейшего повышения уровня углекислого газа. Полагают, что водород может быть использован как альтернативный энергоноситель для использования в двигателях внутреннего сгорания [2]. Водород – самый легкий газ во Вселенной без запаха, цвета и вкуса. Горит чисто, производя при этом очень мало вредных выбросов [3] [4]. Еще одно преимущество водорода – он может быть произведен из нескольких видов сырья: ископаемого топлива, воды и органического вещества. Водород имеет ряд недостатков, таких как высокая себестоимость производства, проблемы хранения и высокая взрывоопасность газа, что делает его опасным для работы. Некоторые из наиболее распространенных процессов производства водорода:

- электролиз воды,
- газификации угля
- выпаривание.

Водород может храниться в четырех видах, а именно: сжатым, сжиженным, в обратимой сорбции и как элемента в смеси металлических гидридов. По словам Чжоу, компримированный газообразный водород – простейший способ хранения при давлении до 20 МПа, однако, при этом плотность энергии слишком мала для применения в транспортной сфере. Для этого давление должно быть не менее 70 МПа, что в четыре раза выше, чем при использовании в двигателях внутреннего сгорания. Водород также хранится в криогенных системах в виде жидкости при очень низких температурах ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$), но при высоких давлениях (70 МПа). Водород в жидкой фазе имеет более перспективные плотности для применения в транспортной сфере, чем в газовой фазе, но тут мы сталкиваемся с такими проблемами, как стоимость и эффективность процесса сжижения [5].

Плотность водорода в зависимости от температуры при определенных давлениях приведена на рис. 1.

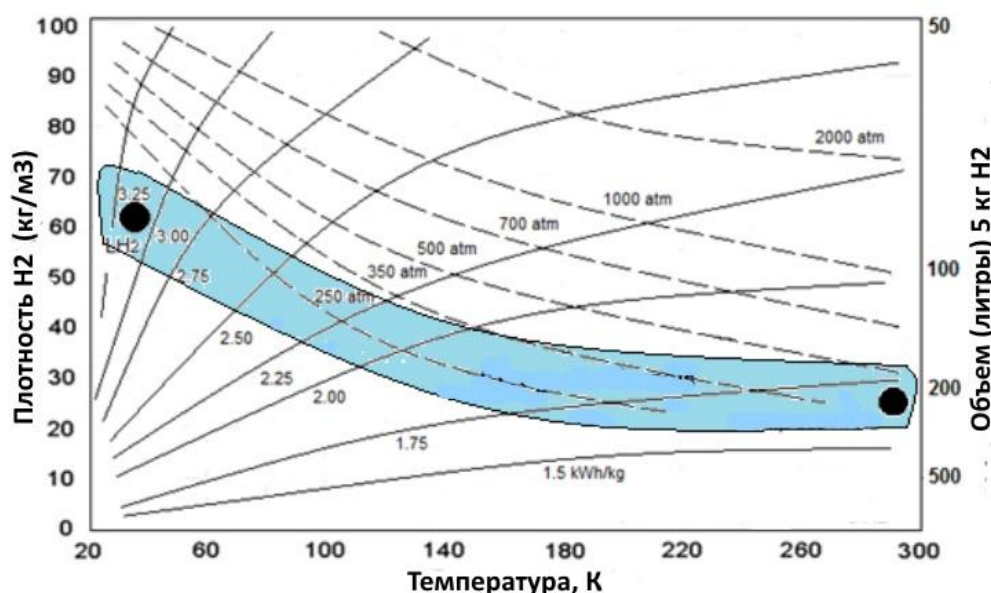


Рис. 1. Зависимость плотности водорода от температуры при определенных давлениях

Рис. 1 показывает, что 1.75 кВт*ч/кг энергии требуется для сжатия водорода до 350 атм. при температуре окружающей среды. Плотность от 20 кг/м³ и 30 кг/м³

Для хранения жидкого криогенного водорода требуется вдва раза больше энергии, чем для хранения сжатого газообразного водорода при температуре окружающей среды. [6] При этом требуются очень сложные изоляционные материалы, необходимые для устранения выкипания водорода. Это означает, что криогенные системы должны быть хорошо утеплены высокоэффективным изоляционным материалом, чтобы предотвратить утечки за счет испарения в атмосферу. Массовая заливка утеплителя – наиболее распространенный тип изоляции и используется в вакуумном пространстве, чтобы ограничить передачу тепла из-за теплопроводности. Примерами таких материалов являются неорганические соединения в их фиброзной форме, такие как стекловолокно и аэрогель, перлит порошок или порошок кремнезема [7]. Считается, что наиболее эффективный тепловой барьер для криогенного применения это слоистый композитный изоляционный материал, действующий в условиях высокого вакуума. Многослойная изоляция является отраслевым стандартом для изоляции криогенных контейнеров. Этот композитный изоляционный материал защищает от выкипания и утечек гораздо лучше, чем обычная изоляция.

Компоненты многослойной изоляции. Типичная многослойная вакуумная суперизоляция состоит из щитового материал (экрана), прокладочного материала и пленочного материала (рис. 2). Это сочетание

материалов используется в вакуумном пространстве для ограничения теплообмена в криогенной жидкости. Тепло может передаваться тремя способами, а именно: теплопроводностью, конвекцией и излучением. Экраны минимизируют тепловой поток от излучения, а прокладки минимизирует проводимости между щитами. Как правило, щитовой материал является покрытием на пленку, добавляющим прочность изоляции. Установив данное сочетание материалов в вакуумном пространстве можно дополнительно ограничить передачу тепла путем конвекции. В некоторых случаях в вакуумном пространстве используются только щит и прокладочный материал.

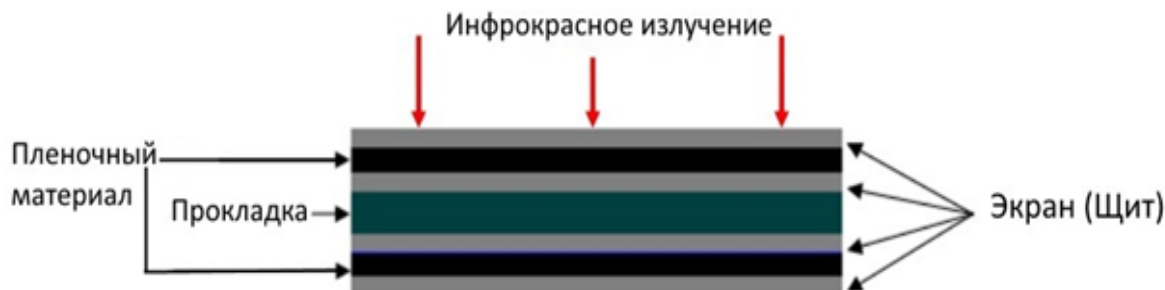


Рис. 2. Многослойная вакуумная суперизоляция

Материал экрана. Криогенные системы, которые действуют между 300К и 77 К или ниже, используют многослойную вакуумную суперизоляцию и почти полностью тепловой поток состоит из волн инфракрасного света [8]. Длина волны инфракрасного света составляет от 0,7 до 300 микрометров (короче микроволн, но длиннее, чем у видимого света) с частотой примерно 1 и 430 ТГц. Микроскопически, инфракрасный свет либо поглощается или испускается, когда эти лучи падают на объект, увеличивается движение поверхности молекулы. На то поглощается или испускается инфракрасный свет, влияют температура окружающей среды, отражательная способность, а также коэффициент поглощения и излучательная способность поверхности. Рис. 3 иллюстрирует, как инфракрасный свет поглощается или отражается экраном.

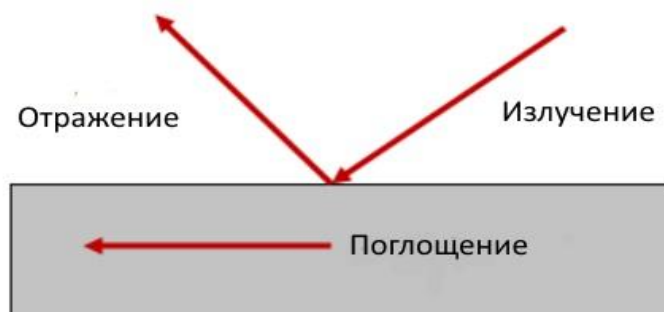


Рис. 3. Поглощение и отражение процессов в непрозрачной среде

Закон Кирхгофа гласит, что: при тепловом равновесии, излучательная способность черного тела равна его поглотительной способности. Значение излучательной способности является свойством поверхности, что обеспечивает меру того, насколько эффективно поверхность излучает энергию относительно абсолютно черного тела. Плохим отражателем является хорошим излучателем и наоборот. Символ ϵ используется для обозначения излучательной способности материала и имеет значения в диапазоне $0 \leq \epsilon \leq 1$. Значение коэффициента излучения материала сильно зависит от шероховатости поверхности [9]. Черное тело имеет коэффициент излучения значения $\epsilon = 1$, другой материал не может излучать больше энергии, чем черное тело. Поглощающая способность-это свойство, которое определяет долю облучения, поглощенной поверхностью. Символ для поглощаемости является α , со значения в диапазоне $0 \leq \alpha \leq 1$. Если поглотительная меньше, чем один, то часть излучение отражается. Щитовой материал, используемых для многослойной изоляции имеет низкие значения излучательной и поглотительной способностей и излучают большую часть инфракрасного света, а поглощая только маленький процент излучения инфракрасным светом. Типичным материалом для экрана является полированная позолоченная полимерная пленка, которая имеет излучательную способность 0,01 и, скорее всего, отражают почти весь инфракрасный свет. Отполированное серебро и алюминиевая фольга также имеют перспективные значения излучательной способности [9]. Значения коэффициент излучения различных материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Материал	Коэффициент излучения, ϵ
Алюминиевая фольга	0,02
Отполированная медь	0,03
Полированное серебро	0,02
Отполированное золото	0,01
Нержавеющая сталь	0,87
Кремний	0,05

Материал прокладки. Этот материал предназначен для ограничения передачи тепла из-за проводимости между двумя экранами. По словам Вэй, прокладочный материал бумажного вида является наиболее используемым, в то время как композитная бумага заменена на полимерную сетку, также используемую как экран, для дальнейшего снижения передачи тепла. Таким образом, площадь контакта, через которое тепло передается от одного щита к другому, гораздо меньше, чем с обычной бумажной прокладкой. Предел прочности материалов оказывает влияние на порядок установки. Типичные прокладки используют в качестве материала бумагу из стекловолокна, гофрированную полиэфирную пленку, стекловолокно и экран с виниловым покрытием, хотя бумага из стекловолокна имеет плохую прочность на растяжение.

Заняло бы гораздо больше времени, чтобы установить вставки стеклянного волокна по сравнению со стеклянными тканями, которые являются прочным материалом для работы. Вес вставки имеет первостепенное значение при проектировании криогенных систем для транспортировки, так как система должна быть легкой. Считается, что волокнистые прокладки являются более перспективными для криогенных систем из-за более длительного теплового пути между волокнами, хотя они имеют более низкие значения прочности на растяжение, из-за чего процесс установки занимает намного больше времени [10].

Считается, что эффективность теплопроводности волокнистого материала зависит от твердой проводимости волокнистого материала, модуля Юнга, пористости, приложенного давления и ориентации волокон. По словам Квона, чем длиннее путь тепла в волокне, тем труднее передавать тепло между экранами.

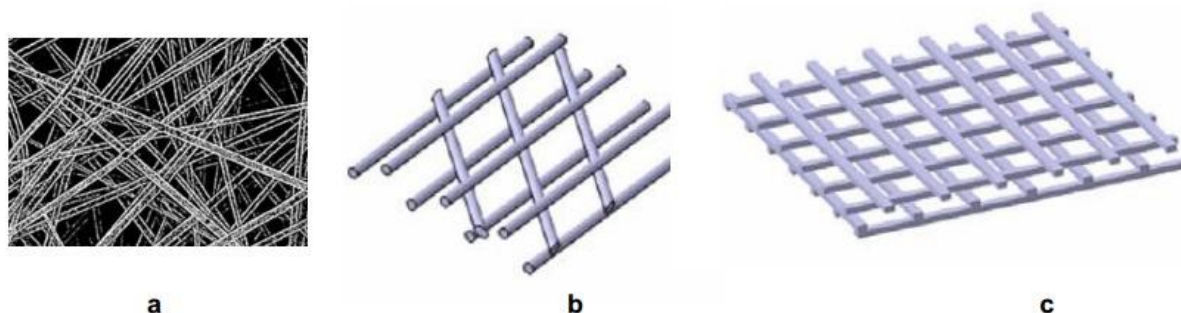


Рис. 4. Структура волокна:

a – случайно-ориентированные волокна, b – параллельно-ориентированные волокна, c – шахматная ориентация волокон

Первая иллюстрация (рис. 4 а) показывает, бумагу, волокна которой ориентированы случайным образом относительно перпендикулярных главных направления потоков теплоты. Согласно Фрике, бумаги из стекловолокна с беспорядочно ориентированными волокнами может достигать тепловой проводимости 1.5×10^{-3} В/мК, если внешнее давление держится ниже 1 бар. На рисунке с параллельно-ориентированной структурой волокон (рис. 4 б) показано, что волокна при таком расположении генерируют более расширенный тепловой контур. Такие волокна, как известно, имеют более низкую тепловую проводимость, чем хаотично расположенные волокна. Другой способ уменьшения твердой проводимости – распространение тепла по пути в шахматном пучке (рис. 4 с). Эта структура получена путем размещения прямоугольного поперечного сечения балки первого слоя под прямым углом ко второму слою [11]. Использование прямоугольного поперечного сечения балки тоже увеличивает жесткость. В шахматном пучке структура примет форму I пучка излучения, что способствует дальнейшему совершенствованию прочности на разрыв разделительного материал. Различные материалы были рассмотрены Квоном для такой конфигурации, и было обнаружено, что полимеры проявляют наилучшую производительность.

Пленочный материал Пленочный материал является одним из наиболее важных компонентов в слоистой изоляции, потому что он добавляет прочности материалу экрана для того, чтобы иметь возможность

наматывать его вокруг криогенного бака. Число слоев пленки называется слоевой плотностью многослойной изоляции. Чередующиеся слои пленочного материала, экранов и низкопроводимого прокладочного материала, называется изоляционным покрытием. Типичные пленочные материалы это майлар, кэптон, тэдлар и тефлон. Широко используется пленка и прокладка из майлара с алюминиевым покрытием на одной или обеих сторонах листа полимера и стекловолоконистой бумаги. Этот тип слоистой изоляции представляет собой эталон для сравнения [12]. Листы майлара могут быть произведены с толщиной от 3.8×10^{-4} м и имеет теплопроводность 0,151 тогда как тефлоновые листы имеют толщину 12.7×10^{-4} м и тепловой проводимость 0,209. Майлар также имеет самую низкую плотность и тепловое расширение из этих двух материалов.

Общий алгоритм поведения многослойной изоляции. Согласно Уикстрему, эта изоляция сильно анизотропна и очень чувствительна к сжимающим нагрузкам. При многослойной изоляции слои установлены слишком плотно, и теплопроводность увеличивается из-за уменьшения зазора между альтернативных слоев. Если многослойная изоляция слишком свободна, тепловая проводимость будет оказывать влияние на нижней стороне изолированного бака. Многослойная изоляция требует внимательного отношения при укладке, и, по словам Иоанна, трудно или почти невозможно поддерживать зазор между слоями пленки [13] [14].

Термическое поведение одеяла многослойной изоляции измерялась БендаэтАлем. Измерения сосредоточены на крупных образцах, которые используются в промышленных установках. Согласно Бенду, исследование было проведено с целью оптимизации изоляции и его термического поведения. Были использованы два криостата для оценки тепловых характеристик. [8].

Первый – вертикальный цилиндрический криостат окружен теплоизоляцией в вакууме. Холодная граница температуры была сгенерирована внутри цилиндра с использованием жидкого гелия при 4,2 К. Теплая граница была установлена с помощью газообразного азота при 78К. Второй испытываемый аппарат был плоской конфигурации с холодной и теплой граничными температурами. Соответственно, это исключает такие параметры, как излучательная способность материала и коэффициент видимости. Были протестированы пленочные материалы, материал экрана, а также материал прокладки, используемые в одеяле криогенной изоляции. Результаты показали, что лучшее сочетание для криогенный одеяла – двойной алюминизированный майлар с гофрированным алюминиевым щитом и стекловолоконной бумажной прокладкой.

Для закрытия использовался метод алюминиевой ленты или липучки, которая использовалась в более эффективных установках, чтобы присоединиться края там, где это представляет собой проблему. Это привело к повышению теплоотдачи, благодаря чему соединительный и дополнительный материалы были добавлены в одеяло. Проблема была преодолена с помощью прокладки из лавсановой пленки между чередующимися слоями липучки для ограничения теплопередачи. Количество прокладок изменяется от слоя к слою: холодная сторона, три прокладки между двумя отражателями, теплая сторона, одна между отражателями, в общей сложности 15 прокладок. Это необычное одеяло дает самые низкие значения теплопроводности в вакууме с давлением ниже 10^{-5} Па. Причина использования гофрированного алюминиевые щита заключается в том, что только определенные моменты касается разделительного материала, что ведет к снижению теплопередачи. ЛебрэнэтАль работал над очередным проектом, где теплоизоляция требуется в ЦЕРНЕ для адронного коллайдера, что бы она работала как эффективный тепловой барьер при изменениях в условиях вакуума.

Согласно ЛебрэнэтАлю, перспективная комбинация для многослойно изоляции – двойная алюминизированная полиэфирная пленка с полиэфирной сеткой разделительного материала. Производительность серийно выпускаемой изоляции была испытана Аугостовичем и Фесмиром. Комбинации алюминиевой фольги, стекловолокна, бумаги, ткани из полиэстера, композитного одеяла кремнеземного аэрогеля, пирогенного кремнезема, кремниевого аэрогеля, а также других материалов были испытаны. Их результаты представлены в табл. 2.

Образцы изоляции (табл. 2) были испытаны в теплой и холодной граничных температурах в 90 К и 300 К соответственно. Был сделан вывод, что алюминиевая фольга без пленочного материала может быть использована с прокладкой из стекловолоконной бумаги. Одеяло многослойной изоляции с плотностью слоев 40, в вакууме 13 мбар без какого-либо пленочного материала, показывает результат теплопроводности как минимум 13.6. Изоляция (алюминиевая фольга и стекловолоконная бумажная прокладка.), проверенная этАлем, состоящей из 50 слоев алюминиевой фольги и стекловолоконной бумаги, показала замечательную низкую теплопроводность 0.06 при вакуумметрическом давлении 4×10^{-5} торр. Дальнейшие усовершенствования были сделаны к изоляции посредством перфорирования щитового материал. Тепловая производительность перфорированного многослойного одеяла изоляция была экспериментально испытана [15].

Холодная граница температуры калориметра был изолирован слоем плотность 20, 30, 40 и 50 слоев соответственно. Вэй заключил, что тепловые характеристики перфорированного одеяла сильно пострадали от строения и формы. Изоляционное покрытие со слоем плотностью 50 пропускает тепловой поток 0.77 В/м^2 .

Таблица 2

Описание изоляции	Вакуум (мбар)	Проводимость (мВ/мК)
Слоистая композиционная изоляция из стекловолоконной бумаги и дисперсного пирогенного кремнезема	13	6,07
Многослойная изоляция (алюминиевая фольга и стеклоткани бумажная прокладка), 40 слоев на 1.8 сл/мм	13	13,6
Слоистая композиционная изоляция из полиэстера и дисперсного пирогенного кремнезема	13	9,66
Слоистая композиционная изоляция из стекловолоконной бумаги и композитного одеяла кремнеземного аэрогеля	13	7,71
Слоистая композиционная изоляция из стекловолоконной бумаги и кремниевого аэрогеля	13	6,82
Слоистая композиционная изоляция из полиэстера и композитного одеяла кремнеземного аэрогеля	13	8,78

Методы тестирования для многослойной изоляции. Считается, что тестирование изоляционной эффективности слоистой изоляции является сложным процессом из-за крайней осторожности, которую нужно предпринять для изготовления и установки. Большинство аппаратов, применяемых для испытаний изоляции при таких низких границах температур, используют так называемый метод криогенного калориметра с кипящим слоем. Холодную массу, например жидкий азот, заливают в теплоизолированную емкость и взвешивают. Как только тепло будет передаваться через изоляционный материал, жидкость начнет нагреваться и испаряться благодаря низкой температуре кипения. Жидкая масса испаряется прямопропорциональна количеству тепла, передаваемого через изоляцию к криогенной жидкости.

Бапат считает, что цилиндрический аппарат, работающий на принципе испаряемого измерения, является наиболее предпочтительным для тестирования эффективности обсуждаемой изоляции. Согласно Кагнеру, цилиндрической способ имеет такие преимущества, как максимальная площадь поверхности и минимальное влияние края зоны [16]. Используя этот способ легко контролировать вторичные утечки тепла, но эти цилиндрические механизмы не могут быть использованы для проверки влияния механических нагрузок между чередующимися слоями.

Усовершенствованный метод испытания рулонного изоляционного материала был разработан в Космическом Центре Дж. Ф. Кеннеди (рис. 5) [17]. В этом методе нержавеющей стальной баллон заполняется жидким азотом. Многослойная изоляция наматывается на медные втулки с определенной плотностью слоев с помощью машины для упаковки, и затем надвигается на цилиндр из нержавеющей стали.

Тепловые характеристики проверяются путем снятия показаний температуры альтернативных изоляции между слоями. Система отпарного калориметра позволяет прямое измерение теплопроводности материала изоляции. Чтобы предотвратить тепловые утечки через концы криостата НАСА использовал тепловой щит, состоящий из жидкого азота на концах контейнера, и учитывается только влияние изоляции по всей камере с жидким азотом.

Проблема с этой системой заключается в том, что она требует подвода жидкого азот, что добавляет дополнительного тепла в систему за счет теплопроводности через впускную трубку [17]. Фесмир с коллегами провели многократные испытания на различных композиционных теплоизоляционных материалов используя этот метод, и было установлено, что прогнозируемые результаты согласуются с их экспериментальными результатами.



Рис. 5. Иллюстрация калориметра с жидким азотом для проверки эффективности

НАСА разработала другой испытательный аппарат в криогенной испытательной лаборатории для измерения изоляции (рис. 6). В этом аппарате установка состоит из вакуумной камеры с нержавеющей стальным цилиндром, заполненным жидким азотом.

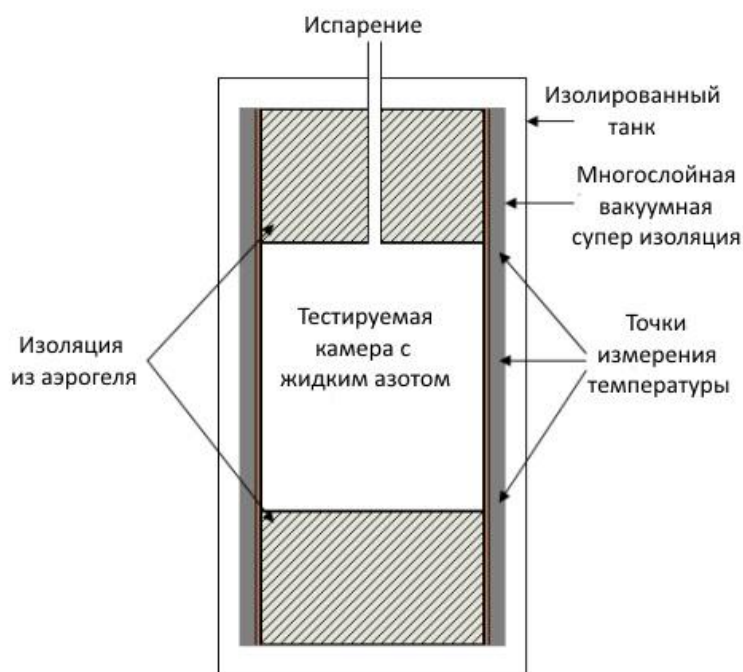


Рис. 6. Иллюстрация калориметра кипящего слоя для тестирования многослойной изоляции

Внутренний танк легко снимается и может также быть помещен в упаковочную машину для установки изоляции. Подвод тепла через концы внутреннего цилиндра сводится к минимуму за счет тепловой щита: дисков, изготовленных из аэрогеля с серебряным покрытием пленочного материала между ними. Измеряется вес системы, по мере испарения. Из этих данных производительность изоляции и рассчитывается. Этот способ обеспечивает более последовательные измерения, вследствие уменьшения передачи тепла через впускные трубопроводы.

Установка изоляции. Щиты и прокладочный материал для установки на криогенные контейнеры обычно поставляется в рулонах. В случае контейнера цилиндрической формы, как и в двух тестовых методах, описанные выше, изоляции наматывают вокруг контейнера.

НАСА использовали машину для упаковки, которая состоит из трех роликов, которые используются для различных конфигураций многослойной изоляции. Цилиндр, наполненный криогенной жидкостью, помещается на машину, а затем набор роликов наматывает изоляцию на контейнер путем вращения роликов. Усовершенствованный способ и устройство для изготовления многослойного одеяла придумали Гонджи с коллегами. Их машина умеет наматывать несколько слоев вокруг оправки и резать материал вдоль линии во время намотки или по окончании намотки процедуры. Одеяло удаляется после того, как края привязаны друг к другу вдоль окружности. Различная плотность слоев может быть достигнута, когда напряжение двух материалов будет настроено [18].

Для оценки эффективности изоляции при хранении жидкого водорода в 2010 году Якобс Генри Ходман провел эксперимент, используя экспериментальную установку для оценки эффективности МВСИ (рис.7).

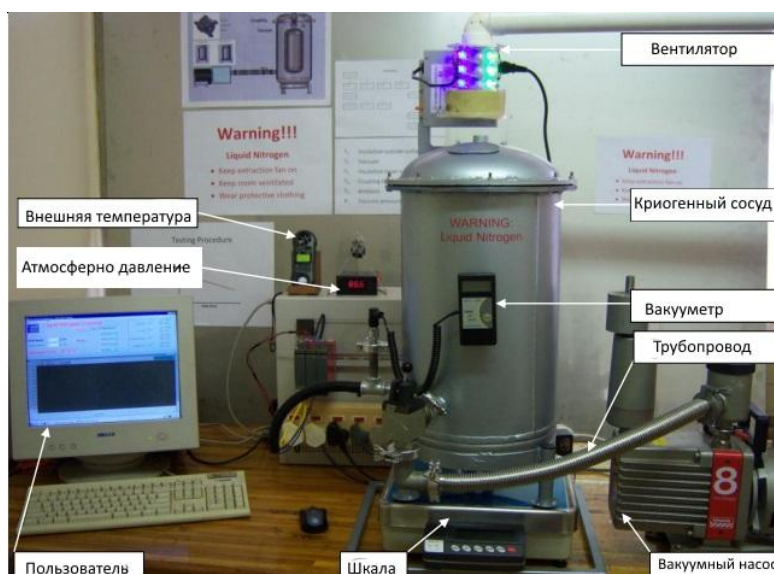


Рис. 7. Установка для измерения эффективности многослойной вакуумной супер изоляции

Он состоит из трех узлов: вакуумного питания, криогенной емкости и контрольно-измерительного оборудования. Вакуумное питание состоит из трубопровода, подключенного к вакуумному насосу для создания достаточного вакуума в изоляционном пространстве.

Вакуумные насосы широко доступны в различных модификациях. Двухступенчатый роторный вакуумный насос с лопастями Эдвардс E2M18 АТЕХ был выбран, исходя из низкого вакуумного давления, которое может быть достигнуто с его помощью. Пластинчато-роторный насос E2M18 АТЕХ работает с перегрузкой, имеет герметичные насосные камеры и клапан газосброса. Эти позволяют достичь вакуума до 10^{-3} торр.

Вакуум и показания температуры регистрировались в течение всего испытания, поэтому было важно использовать точные и надежные измерительные приборы. Было решено проводить измерение вакуума пьезорезистивным керамическим датчиком.

Этот датчик может измерять уровень вакуума от 0,001 мбар до 100 мбар. Прибор работает таким образом, что когда он находится под влиянием давления, тонкая диафрагма изгибается и вызывает изменение сопротивления резистора. Сила изгиба меняет настройки резистора, и создает значение, характерное для приложенного давления. Прибор позволяет использовать 9 вольтовый аккумулятор, который дает возможность прикрепить его к танку без внешнего питания. Вакуумметр показан на рис. 8.



Рис. 8. Компактный вакуумметр

Различные температурные показания были сняты, в основном, внутри криогенного сосуда. Точки измерения температуры показаны на рис. 9.

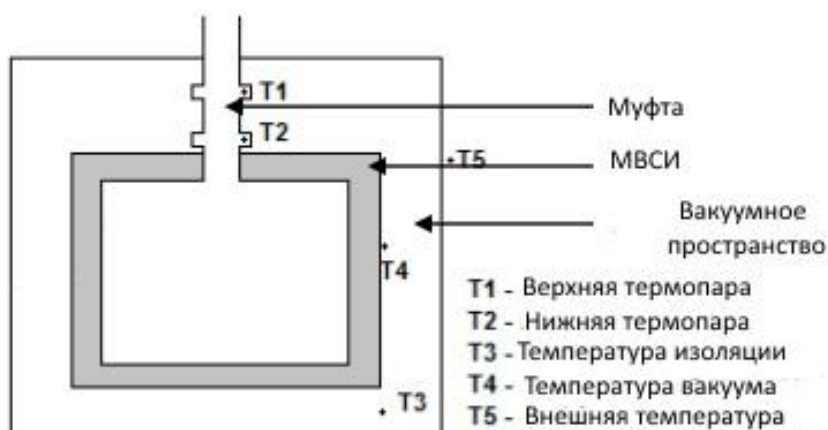


Рис. 9. Схема для измерения температуры

Верхняя и нижняя температуры муфты были измерены при использовании двух термопар, в то время как три К-термопары использовались для вакуумной изоляции, температуры вакуума и температуры окружающей среды. Эти термопары были установлены через стенку наружного сосуда. В зазорах между термопарами и изоляционным материалом, были обнаружены утечки вакуума. [19]

Эта проблема была решена с помощью специально разработанных фитингов, связанных тонкой медной проволокой, которую подают через штуцер из нержавеющей стали, наполненных смолой. Термопары впоследствии были соединены на обеих сторонах фитинга с медными проводами.

Термопары и датчики были откалиброваны перед измерениями. Аналоговый преобразователь переводит сопротивление термопары в сигнал напряжения, который поступает на компьютер пользователя и преобразуется в измерение температуры. Интерфейс аналогопреобразователя показан на рис. 10.

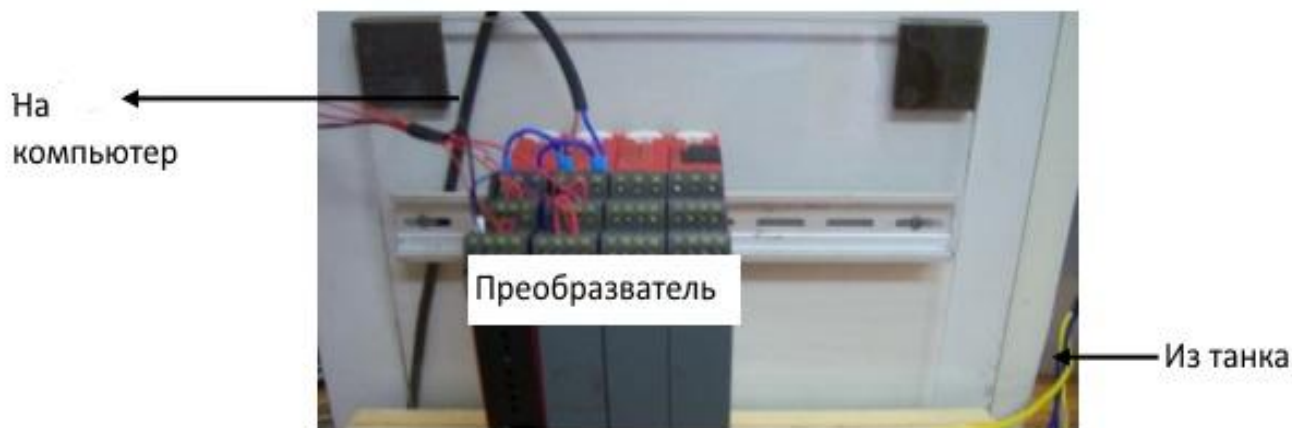


Рис. 10. Температурный аналоговый интерфейс

Высокоточные электронные весы модели PRW используются для измерения выкипания. Они имеют уникальную возможность измерения до 30кг с шагом 0,1 г, что обеспечивает возможности точного измерения выкипания газа. Металлическая платформа предотвращает шкалу от повреждения криостатом (рис. 11).

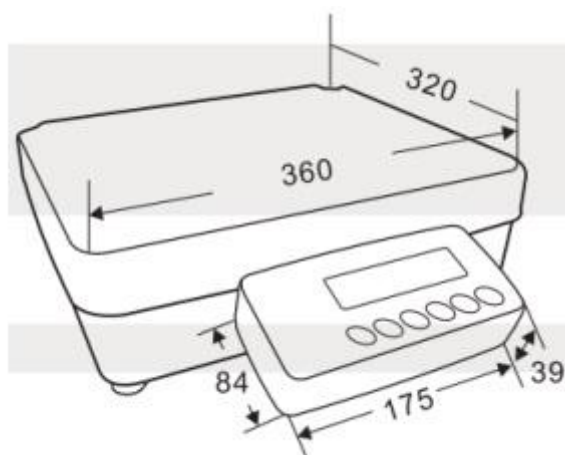


Рис. 11. Схема стенда высокой точности, используемого для измерения потери веса (отпарного эффекта): настройки–процедуры–тестирования

Для того чтобы протестировать МВСИ нужно было прикрепить внутренний бак стенда и утеплить его с определенной плотностью слоя. Изолированный внутренний бак после этого аккуратно снимается со стойки и крепится к нижнему фланцу муфты с использованием медных уплотнений. Затем был смонтирован и поставлен верхний фланец наружного бака. После подключения термодатчиков внутренний бак был помещен внутри наружного бака и закрыт с помощью восьми шестигранных болтов. Потом система была готова для вакуумной откачки. Вакуумный датчик был использован, чтобы указать, когда был достигнут необходимый уровень вакуума. Как только система достигла давления ниже 2 мбар, задвижка была закрыта и газопровод отключен. При помощи трубы заполнения трубы 3кг жидкого азота были аккуратно влиты в криогенный сосуд.

Для того чтобы испаряющийся газ не возвращался в систему был использован вытяжной вентилятор, подключенный к трубопроводу и установленный на «пустые» стойки. В целях безопасности еще более мощным вытяжным вентилятором был установлен в помещении и электроснабжение обоих вентиляторов было подключено к основному источнику питания.

Измерения температуры и давления проводились каждую секунду и отправлялись через аналоговый преобразователь к ПК. Когда уровень вакуума достиг 6 мбар, вакуумный трубопровод был снова подключен для создания требуемого уровня вакуума. Вес системы измерялся каждую минуту, и данные сохранялись на протяжении всего периода тестирования для последующей обработки.

Для того, чтобы проверить эффективность МВСИ, конфигурация из десяти слоев изоляции была установлена на сосуда под давлением и протестирована ее производительность на основе отпарного азота процедуры, описанной выше. Система была испытана с трубой обычной прямой конфигурации. Эта же конфигурация была испытана и на следующий день. Во второй раз быстро выросло количество испарившегося азота.

Можно сделать вывод, что либо криостат не работает должным образом, либо изоляционные свойства изменились. Новая изоляция была установлена и испытана в то же образом, чтобы определить, что стало причиной роста. Если криостат функционировал правильно, результаты испытания должны были быть похожи. Результаты, полученные для обоих испытаний, показаны на рис. 12.

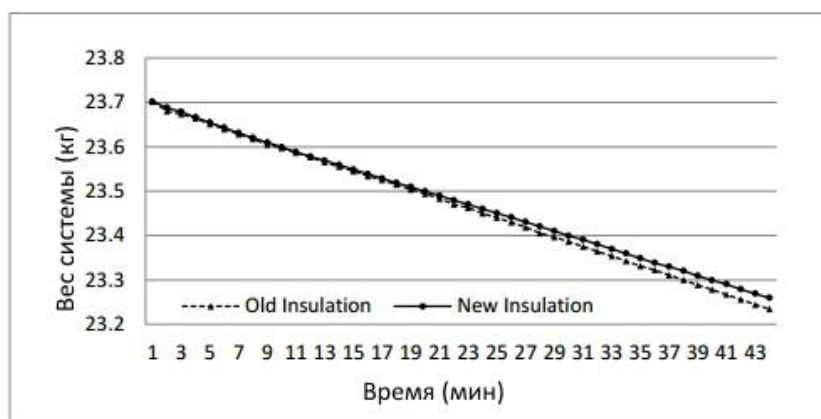


Рис. 12. Вес системы в зависимости от времени

Полученные результаты показали уменьшение веса на 6.5 % в сравнении между старой и новой изоляцией в течение 43 мин.

Система предназначена для тестирования МВСИ для коротких периодов, следовательно, система действовала только в течение короткого периода времени, по истечении которого клапан был открыт. Азот, присутствующий в системе, стал причиной образования льда на поверхности и между слоями изоляции из-за наличия влажного воздуха, который попал в систему.

Как только система достигает температуры окружающей среды через несколько часов, лед тает, оставляя влагу между слоями изоляции, которая поглощается стекляннным волокном прокладочного материала. Эта влага выступает как путь прямой проводимости между слоями МВСИ, что снижает качество изоляции при испытании во второй раз.

Чтобы подтвердить, что влага нет между альтернативными слоями, изоляция была удалена из внутреннего бака, взвешивалась и хранилась в сухом месте в течение нескольких дней. Впоследствии проводилось второе взвешивание, и была зафиксирована потеря веса в 2,7 г, которая может быть приписана только к потере влаги.

Отклонение между тестами и выполнением эксперимента с системой было дополнительно проверено путем проведения трех испытаний с теми же настройками, что и ранее. Все три испытания были проведены в течение 2 ч и полученные результаты выкипания показаны на рис. 13. Результаты выкипания были практически идентичны. Максимальное отклонение в 0,5 % было получено в течение тестового периода 110 мин, что указано на то, что экспериментальная система выдает надежные результаты. Процесс установки известен и система работает, как следует.

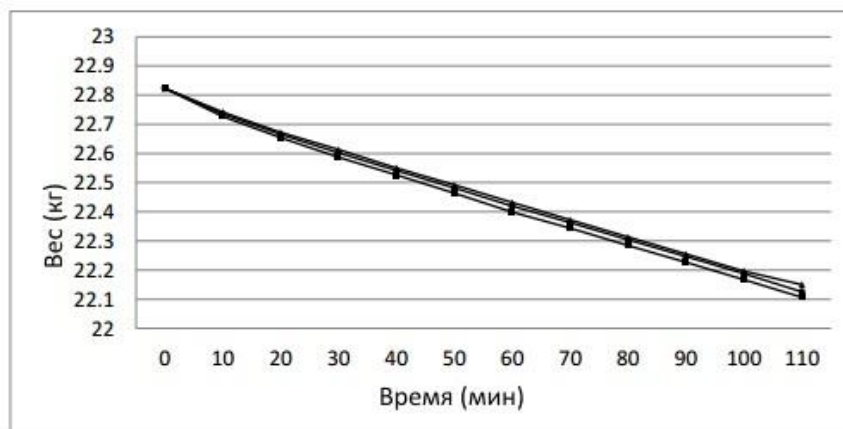


Рис. 13. Вес системы в зависимости от времени

Разница температур над входным патрубком была почти постоянной в течение тестового период, что свидетельствует о более высокой интенсивности теплообмена. Разница температур для муфты достигла максимального значения в первые несколько минут, а потом снизилась. На поверхности изоляции температура (Т 4) представлена в зависимости от времени и показана на рис. 14. Температура поверхности изоляции снизилась примерно до $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ в первые 250 с.

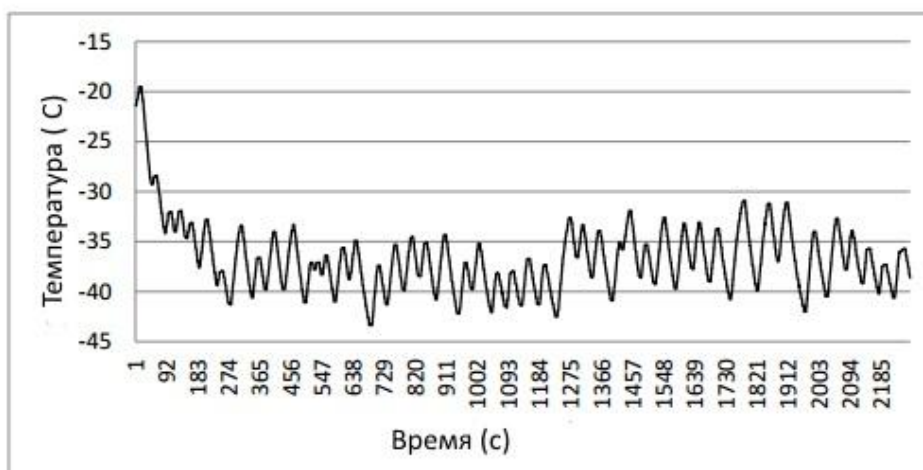


Рис. 14. Температуры поверхности МВСИ

Данную форму кривой можно объяснить работой вакуумного насоса, который постоянно включается и выключается, чтобы сохранить необходимый уровень вакуума. Это также указывает на влияние уровня вакуума на температуру поверхности изоляции. Был сделан вывод, что каждый потерянный 1 мбар вакуума, температура поверхности изоляции возрастет на 2,5–3 °С.

Подобные опыты с другими видами изоляции будут проводиться на базе лаборатории криогенных температур НИУ ИТМО ИХиБТ [20].

Заключение

Термическое поведение одеяла слоистой изоляции – это не только физическая функция такая, как теплопроводность, излучательная и поглощательная способности, а также зависит от типа установки, силы сжатия между слоями, а также метода соединения внутреннего и наружного резервуаров. На температуру изоляции влияет уровень вакуума, который сообщен системе, а так же наличие влаги между слоями.

Применение многослойной вакуумной суперизоляции для криогенных систем хранения является наиболее перспективным. Производительность данной изоляции может ограничить выкипание газа.

В ходе проведения испытаний было установлено, что постоянное давлениях играет важную роль в производительности изоляции. Если давление меняется во время тестирования, то меняется температура поверхности МВСИ, что приводит к высоким показателям теплоотдачи и утечкам.

Литература

1. The evolution of the world's energy systems; Shell International Limited , 1996.
2. Yaung Seo Kim ,Byung Ha Kang Thermal design analysis of a liquid hydrogen Vessel / YaungSeoKim ,Byung Ha Kang ; International Journal of Hydrogen Energy, pp. 133-141, 1999.
3. Sulliva, Laurence Hydrogen as an Alternative Energy , 2008.
4. Heiserman L. David, Exploring Chemical Elements and their compounds.: TAB Books, 1992.
5. Zhou Li. Progress and Problems in Hydrogen Storage Methods / Li Zhou ; Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 395-408, 2004
6. Salvador Aceves, Espinosa Francisco Loza, Ledesma Elias Orozco High density outomotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels, International Journal of Hydrogen Energy, pp. 1219-1226, 2009.
7. James E. Fesmire // *ryogenic Test Laboratory*, 2005
8. Benda V., Bozzini B., Riddone G., Vandoni G. «Measurement on different MLI systems between 77 K and 4 K and their application in cryogenic engineering» // European Organization for Nuclear Engineering, 2000.
9. Frank P Incropera, David P Dewitt, Theodore L Bergman, and Adrienne S Lavine Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
10. Wei Wei, Xiangdong Li, Rongshun Wang, Yang Li. Effects of structure and shape on thermal performance of Perforated Multi-Layer Insulation Blankets, Applied Thermal Engineering, pp. 1264-1266, 2009.
11. Патент US4409770.
12. Fesmire J.E., Augustynowicz S.D. // «Cryogenic Thermal Insulation Systems», Cryogenics Test Laboratory; NASA Kennedy Space Center, Orlando, Florida, 2005.
13. Wikstrom J.P., Fesmire J.E., Augustynowicz S.D., «Cryogenic insulation systems». Florida, 1999.
14. [Интернет материалы] Н. John. (2009, April) «NASA Tech Briefs» [Электронный ресурс] <http://www.techbriefs.com/component/content/article/5050> (дата обращения 12.04.2016)
15. Wei Wei, Xiangdong Li, Rongshun Wang, Yang Li // «Effects of structure and shape on thermal performance of Perforated Multi-Layer Insulation Blankets». Applied Thermal Engineering. PP. 1264–1266, 2009.
16. Kagner M.G. // «Thermal Insulation in Cryogenic Engineering», Isreal Program for Scientific Translation, P. 152 – 166, 1969.
17. James E. Fesmire Improved Methods of Testing Cryogenic Insulation Materials, Florida, 2008.
18. Патент US5143770.
19. Jacobus Henry Hodgman The feasibility and application of multi-layer vacuum insulation for cryogenic hydrogen storage // Potchefstroom, 2011. – P.111.
20. Платунов Е.С., Баранов И.В., Платунов А.Е. Теплофизическая лаборатория низких температур // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 5. С. 65–68

Статья поступила в редакцию 29.09.2016 г.