

УДК 536.7, 621.59

Экспериментальное исследование процессов захлаживания сверхпроводящих транспортных магистралей*

В.П. Фирсов¹, И.В. Антюхов¹, В.С. Высоцкий², А.А. Носов²¹ *Московский авиационный институт (технический университет), Москва, 125993, Россия*² *ОАО «ВНИИКП», Москва, 111024, Россия**e-mail: firsovval@mail.ru*

DOI: 10.34759/tpt-2021-13-5-196-205

Поступила в редакцию 25.04.2021

После доработки 19.05.2021

Принята к публикации 23.05.2021

Рассматриваются экспериментальные методы исследования нового способа транспортировки энергоносителей с помощью гибридной линии передачи энергии, который заключается в объединении трубопроводов транспортировки сжиженного криогенного энергоносителя с кабельными силовыми линиями электропередачи, что обеспечивает необходимый температурный режим работы сверхпроводников для сверхпроводящих трактов большой длины. Эксперименты на жидком азоте с макетом гибридной линии длиной 10 м подтверждают обоснованность принятых решений. Рассматриваются различные методы процессов захлаживания и работы модельной магистрали.

Ключевые слова: сверхпроводимость, жидкий азот, сверхпроводящий кабель, время захлаживания, тепловые потоки, гибридная энергетическая система, струйная система криостатирования.

Введение

Решение проблем дефицита традиционных энергоносителей, загрязнения окружающей среды, перегруженности транспортных артерий связано с созданием систем одновременной транспортировки водорода и электрической энергии с использованием перспективных сверхпроводниковых материалов. При использовании магистралей с жидким водородом рационально их интегрирование с кабельными линиями электропередачи (СПТМ), выполненными на базе новых высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), потери в которых практически отсутствуют.

Для создания таких систем необходимо экспериментально подтвердить работоспособность принятых решений. Для проведения исследова-

ний физических процессов и отработке технических решений в сверхпроводящей транспортной магистрали (СПТМ) используется криогенная установка СПТМ и универсальный криогенный стенд. Выполненные работы направлены на получение экспериментальных данных по тепловым и гидравлическим характеристикам СПТМ при процессах захлаживания и штатной работы магистрали.

СПТМ состоит из транспортного канала и канала термостатирования. Исследуемый транспортный канал длиной 10 м выполнен в виде основного канала с диаметром проходного сечения 30 мм и кольцевого канала, образованного основным транспортным каналом и трубопроводом с диаметром 50 мм. Основной канал используется в качестве трубы-формера для крепления сверхпроводящего кабеля. Наибольший интерес при захлаживании СПТМ представляют тепловые процессы в транспортном

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-29-10040.

канале. При захолаживании СПТМ необходимо обеспечить равномерность полей температур по его длине и по периметру транспортного канала [1]. Неравномерность полей температур в транспортном канале может привести к серьезным термическим деформациям, ведущим к разрушению сверхпроводящего кабеля, поскольку материалы высокотемпературных сверхпроводников чрезвычайно чувствительны к механическим деформациям.

Задачами настоящего исследования являлись: создание методики проведения захолаживания транспортного канала СПТМ и экспериментальное исследование физических процессов с использованием в качестве модельной жидкости жидкого азота с целью выбора оптимальных параметров.

1. Результаты экспериментальных исследований

Макет сверхпроводящей криогенной транспортной магистрали (СПТМ) состоит из следующих основных элементов:

- магистральный участок для транспортировки криоагента (линейная магистраль);

- силовой сверхпроводящий кабель, охлаждаемый потоком жидкого азота;

- система крионасосов с приводами от электродвигателей для обеспечения необходимого давления в линейных магистралях;

- система захолаживания и криостатирования СПТМ.

Один из перспективных вариантов интегрированной линейной транспортной магистрали представляет собой сложный теплофизический объект, состоящий из транспортного канала (центральной трубы и кольцевого периферийного) и канала термостатирования. Транспортный канал может работать при сверхкритическом давлении от 40 до 50 бар, а канал термостатирования при докритических давлениях (для азота критическое давление равно 34.1 бар). Высокотемпературный сверхпроводящий кабель расположен на внешней поверхности центральной трубы транспортного канала.

Схема экспериментальной установки для испытания макета СПТМ на жидком азоте, представлена на рис. 1.

Она состоит из следующих основных систем и элементов:

- сверхпроводящая транспортная магистраль *l*;

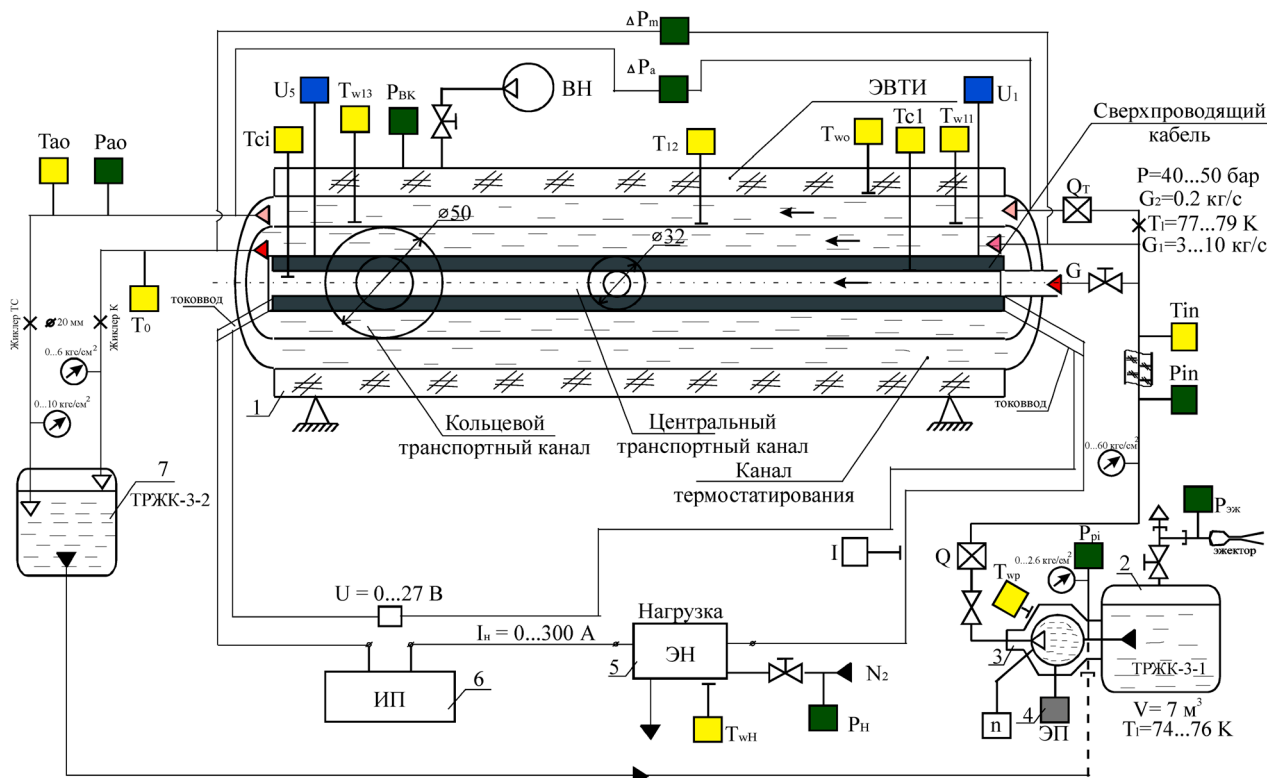


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования интегрированной сверхпроводящей транспортной магистрали на жидком азоте

- два сосуда ТРЖК 3 для хранения жидкого азота 2, 7;
- криогенный насос для подачи жидкого азота 3;
- привод насоса 4;
- электрическая нагрузка сверхпроводящего кабеля 5;
- источник постоянного и переменного напряжения 6;
- автоматизированная система измерений параметров физических процессов и управления работой установки.

Жидкий азот под давлением 2–2.5 бар и массовым расходом до 6 кг/с из расходной емкости подается по магистрали подачи диаметром 50 мм на вход криогенного насоса, а затем под давлением до 50 бар в интегрированную сверхпроводящую транспортную магистраль.

На входе в СПТМ температура жидкости может изменяться от 74 до 80 К. На выходе из СПТМ жидкий азот по двум магистралям из транспортного канала и из канала термостатирования подается в приемную емкость.

На выходе магистралей установлены жиклеры, обеспечивающие необходимый уровень давления в транспортном канале и канале термостатирования и снижение давления на входе в приемную емкость до 1.2–2 бар.

После завершения эксперимента для подготовки к следующему эксперименту жидкий азот перекачивается из приемной емкости в расходную емкость.

1.1. Конструкция сверхпроводящего кабеля СПТМ

Сверхпроводящий кабель для макета СПТМ состоит из двух секции длиной по 5 м. Секции между собой соединяются специальной медной муфтой.

Кабель изготовлен на трубе-формере из нержавеющей стали диаметром 28×30 мм и содержит повив из четырех ВТСП лент сечением 4×1 мм². ВТСП проводники распаяны низкотемпературным припоем на медных токовводах и муфте. Между ВТСП лентами размещены медные ленты. На внешнюю электроизолированную поверхность кабеля с шагом 140 мм намотаны дистанцирующие элементы в виде трубок из облученного полиэтилена с внешним диаметром 7 мм и толщиной 1 мм. Система крепления сверхпроводящего кабеля во входном и выходном узлах обеспечивает его электроизоляцию и устраи-

вает возможные термические напряжения. Четыре сверхпроводящие ленты обеспечивают прохождение тока до 400 А без нарушения сверхпроводимости. Два токоввода обеспечивают подвод внешнего напряжения к сверхпроводнику [2].

По длине сверхпроводящий кабель препарируется потенциальными контактами, датчиками температуры и магнитного потока. Датчики магнитного потока измеряют перераспределение тока между лентами, а датчики температуры и потенциала определяют условия возникновения сверхпроводимости.

1.2. Система захлаживания

Для исследования процессов гидродинамики и теплообмена при захлаживании узлов и агрегатов СПТМ были проведены предварительные эксперименты для определения параметров конструкции системы захлаживания. Горизонтальное расположение СПТМ большой длины относительно вектора силы тяжести способствует сепарации жидкости в парожидкостных потоках и стратификации однофазных потоков. Это вызывает неравномерное охлаждение каналов по периметру и, как следствие, его значительную деформацию (продольный прогиб канала). Поэтому система захлаживания сложной проточной части СПТМ должна обеспечивать следующие условия его функционирования при захлаживании и работе:

- продольный прогиб СПТМ не должен превышать 2 мм/м;
- потери жидкости и газа на захлаживание и время захлаживания должны быть минимальными.

В работе исследовались два способа захлаживания: газовое и жидкостное. Первоначально была выбрана комбинация этих способов с импульсной подачей охладителя в тракт СПТМ. В дальнейшем после проведения экспериментов используется двухступенчатая жидкостная система подачи жидкого азота: через байпасную магистраль и струйную форсунку с малым массовым расходом (30–150 г/с); через основную магистраль подачи жидкости в СПТМ.

При вводе жидкого азота через основную магистраль часть потока поступает в канал термостатирования. Для этого используется система распределенного ввода жидкости в канал термостатирования [3] с целью организации дисперсного потока капель с равномерным их распределением по длине канала.

На завершающей стадии операции захлаживания осуществлялась операция дозахлаживания и заливки магистрали. Для этого открывается вентиль подачи жидкого азота через основную магистраль.

После СПТМ жидкий азот поступает в приемный танк по магистрали диаметром 50 мм с установленной на трубах газонаполненной внешней изоляцией «Изолан» толщиной 40 мм. Для снижения давления перед приемной емкостью до значений 1.5–2 бар на магистрали установлен жиклер диаметром 20 мм.

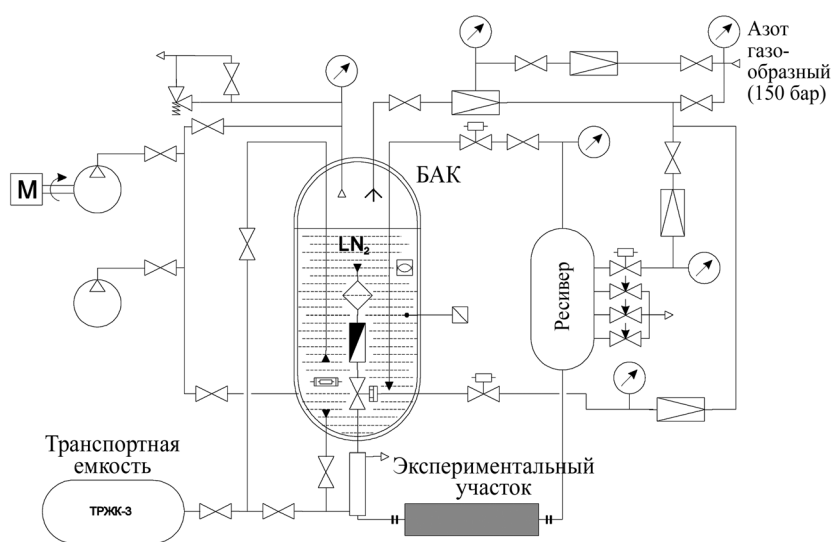


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для проведения опытов с жидким азотом

1.3. Результаты экспериментов по захлаживанию

Для интенсификации процесса захлаживания магистралей была использована струйная система охлаждения магистралей.

На рис. 2 показан принцип действия струйной системы захлаживания. В центре магистрали установлена труба малого диаметра, по окружности которой просверлены отверстия диаметром 0.4 мм. Расстояния между сечениями, где находятся отверстия, от 1 до 2 калибров. Для захлаживания в центральную магистраль подают криожидкость, которая в виде струй охлаждает стенку основной магистрали. При взаимодействии струи жидкости со стенкой, нагретой выше температуры кризиса пленочного кипения, инерционные силы за счет большой скорости истечения уменьшают толщину паровой пленки, а, следовательно, возрастает теплоъем с поверхности канала.

В ряде работ отмечается, что при больших скоростях натекания струи жидкости на стенку возможно более раннее (по температуре) возникновение кризиса пленочного кипения. Обеспечивая минимальное диспергирование вытекающей струи (от устья отверстия до стенки), можно более активно охлаждать поверхность. При распаде струи на капли следует ожидать более позднее возникновение кризиса

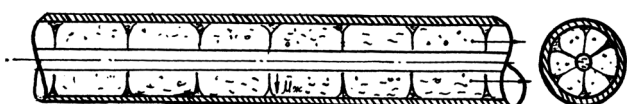


Рис. 2. Принципиальная схема струйной системы охлаждения

пленочного кипения. С ростом недогрева жидкости относительно температуры насыщения в основном канале и скорости истечения из отверстия увеличивается эффективность охлаждения. Особенно эффективен этот метод интенсификации захлаживания для горизонтальных труб, так как позволяет обеспечить равномерную подачу охлаждающей жидкости в верхней части канала.

Для подтверждения этих предположений были проведены опыты по захлаживанию горизонтальной трубы диаметром 70 мм и толщиной стенки 3.5 мм жидким азотом. На рис. 3 представлена схема установки, на которой проводились эксперименты по отработке струйной системы захлаживания.

На рис. 4 представлены результаты опытов по охлаждению поверхности для двух скоростей истечения струй из отверстий – 8 и 13.8 м/с.

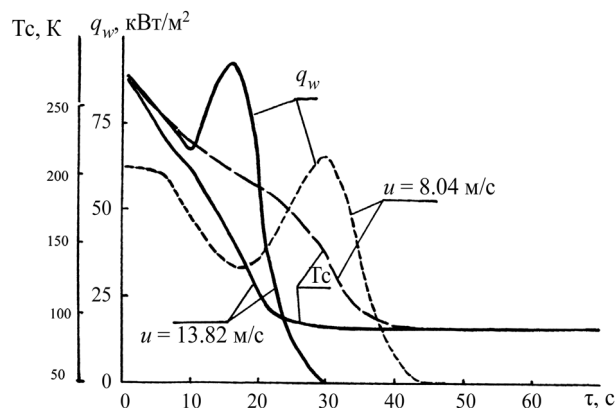


Рис. 4. Изменение температуры стенки канала T_c и плотности тепловой нагрузки q_w при струйном охлаждении канала диаметром 70 мм и толщиной стенки 3.35 мм

Таблица 1. Результаты опытов по охлаждению каналов жидким азотом

Вид течения	P , МПа	G , кг/с	$\tau_{\text{охл}}$, с	Y
Подъемное (гладкий трубопровод)	0.24	0.9	90.0	81.0
	0.24	0.65	200.0	10.0
Горизонтальное (гладкий трубопровод)	0.2	0.28	2500.0 (верх)	700.0
			135.0 (низ)	
Струйное охлаждение	0.2	0.116	37.0	4.3
	0.2	0.184	24.0	4.4

Видно, что кризис пленочного кипения при скорости 8 м/с наступает при температуре стенки 160 К, а при скорости 13 м/с – 210 К. Время захлаживания трубы уменьшается в два раза. При захлаживании трубы обычным способом (организации потока в магистрали) температура кризиса пленочного кипения равна 110–130 К.

Результаты опытов по захлаживанию труб в условиях подъемного и горизонтального течений, а также струйной системой представлены в табл. 1. Здесь приведены данные по суммарным затратам криожидкости на захлаживание и времени охлаждения трубы τ_z . Видно, что даже для условий подъемного течения жидкости в канале получаем сокращение расхода, необходимого на захлаживание в 2–20 раз, а времени захлаживания – в 3–30 раз. Для горизонтального канала полученные результаты подтверждают еще большую эффективность [4, 5]: сокращение расхода до 200 раз и времени до 100 раз.

Таким образом, результаты опытов показывают высокую эффективность струйной системы захлаживания, особенно для горизонтальных магистралей.

Предложенная конструкция СПТМ была модернизирована. Струйное орошение было организовано с наружной стороны магистрали термостатирования.

В дальнейшем были проведены исследования для двух различных методик процесса захлаживания проточной части СПТМ: двухстадийной и одностадийной. После завершения захлаживания магистрали проводится операция по заполнению и дозахлаживанию магистрали. В качестве критерия завершения процесса захлаживания проточной части СПТМ принята температура потока на выходе из магистрали 100–120 К. После захлаживания проводится

заливка магистрали до температуры потока на выходе из магистрали, равной 78–80 К.

При двухстадийной циклограмме захлаживания СПТМ выполнялись следующие операции:

– захлаживание парогазовым потоком из газовой подушки емкости подачи при давлении 0.5 кгс/см² изб. до температуры стенки транспортного канала 200 К в течение 30 минут;

– захлаживание с помощью распределенной системы подачи жидкости из емкости через 12 форсунок диаметром 0.4 мм в дисперсном режиме пленочного кипения до температуры стенки транспортного канала 100 К за 1000 секунд;

– заполнение и дозахлаживание трактов СПТМ жидким азотом за 120 секунд. Этот метод использовался и в работе [6].

Процесс захлаживания трубы-формера завершается к 700 секунде после начала жидкостного захлаживания. Транспортная магистраль захлаживается к 900 секунде. Внешняя поверхность канала термостатирования охлаждается к моменту завершения захлаживания только 180 К.

Заполнение магистрали начинается на 1100 секунде при давлении подачи 1.7 кгс/см² и завершается к 1200 секунде.

Двухстадийная циклограмма захлаживания обеспечивала необходимые температурные параметры основного насоса перед запуском, однако требовались дополнительные операции по подаче в канал пара, что вызывало затруднения при проведении экспериментов. В дальнейшем все усилия были направлены на отработку одностадийной циклограммы захлаживания.

При отработке одностадийной циклограммы захлаживания определялось влияние диаметра жиклера на параметры процесса и давления подачи. Были проведены исследования двух жиклеров диаметрами 2 и 3 мм. При захлаживании изменялось давление подачи жидкого азота в байпасную магистраль.

На рис. 5–12 представлены характерные результаты по захлаживанию с диаметром расходного жиклера 3 мм.

На рис. 5–7 представлены результаты изменения температур потока на входе и выходе магистрали СПТМ и на входе в насос. А также температуры стенок двух каналов – кольцевого и центрального транспортного в сечениях вблизи входа (T_{w14}) и выхода каналов (T_{w3} , T_{w5} ,

T_{w7} , T_{w8} и T_{f2}). На рисунках показаны основные операции при проведении захлаживания, заливки и работе СПТМ (захлаживание, заливка без раскрутки насоса, заливка при работе насоса, работа СПТМ с насосом и момент электронагружения сверхпроводникового кабеля). Анализ процесса захлаживания показал, что время захлаживания магистрали подачи до входа в насос составляет около 90 секунд. В это время на вход в СПТМ поступает парокапельный поток с высоким массовым паросодержанием (0.8–1.0). С 500 до 1500 секунды на вход в СПТМ поступает дисперсный парожидкостный поток. При захлаживании на выходе транспортной емкости диспергированный поток жидкости создается струйной форсункой, расположенной в центре магистрали диаметром 50 мм. Следует отметить, что показания среднего датчика температур на выходе из магистрали на уровне 100–120 К отражает факт захлаживания элементов конструкции всего транспортного канала СПТМ. Показания термодатчиков T_{w3} , T_{w5} , T_{w7} , T_{w8} и T_{f2} отражают в этот момент наступление кризиса пленочного кипения. Поэтому в дальнейшем показания этого термодатчика использовались для определения времени завершения захлаживания. В табл. 2 представлены результаты определения времени захлаживания по средовому датчику и датчику температур T_{w8} , которые подтверждают этот факт. Как показали эксперименты, разница температур в различных сечениях по длине транспортного канала в процессе захлаживания может достигать 100 К.

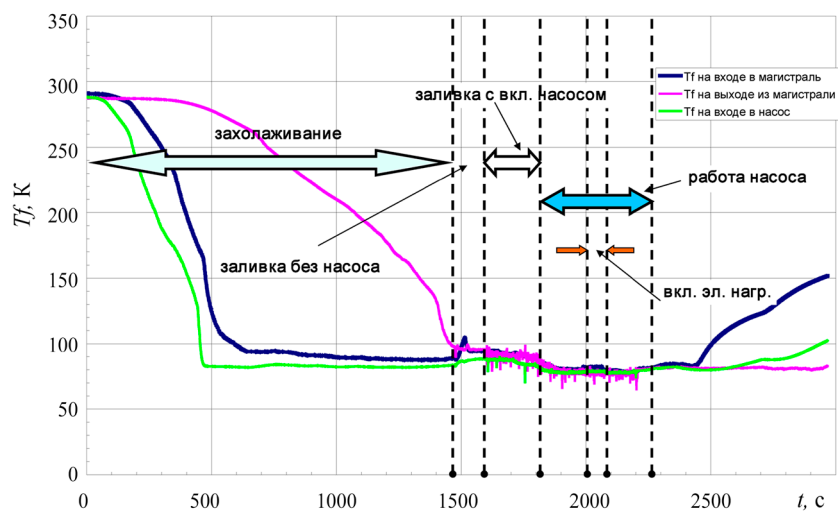


Рис. 5. Изменение температуры среды при захлаживании транспортного канала СПТМ

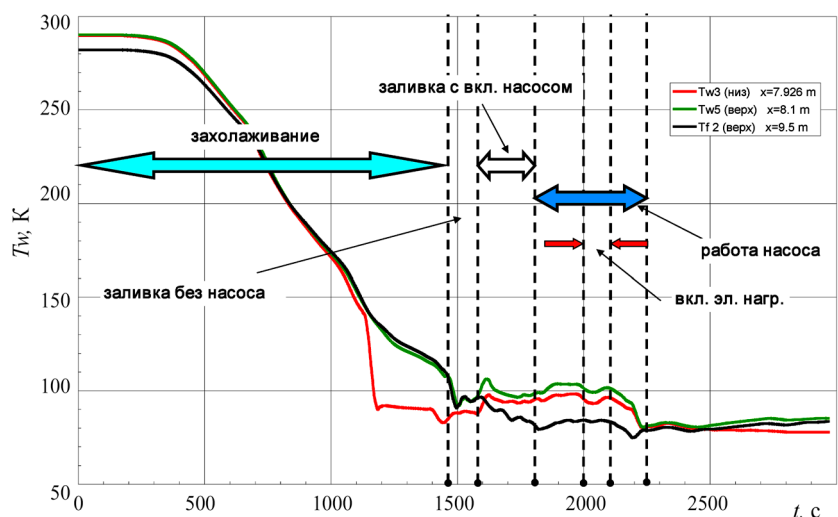


Рис. 6. Захлаживание основного трубопровода транспортного канала СПТМ диаметром 30 мм (труба-формер).

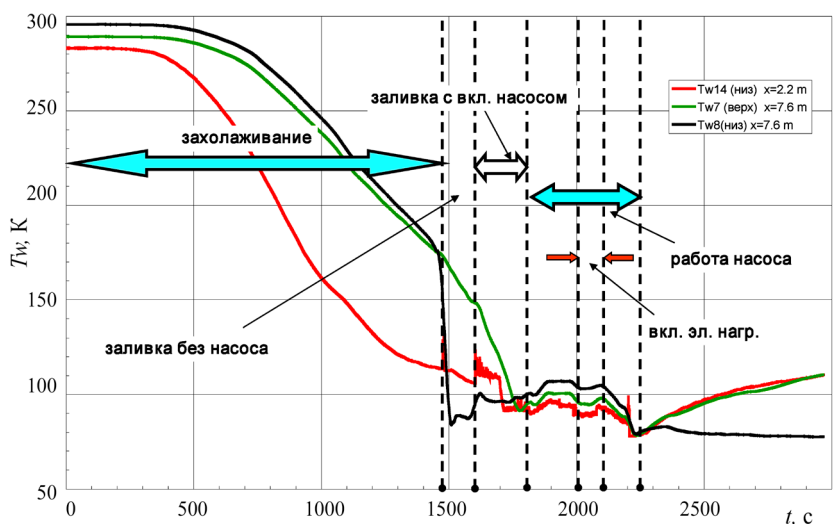


Рис. 7. Захлаживание внешней трубы кольцевого транспортного канала СПТМ диаметром 50 мм

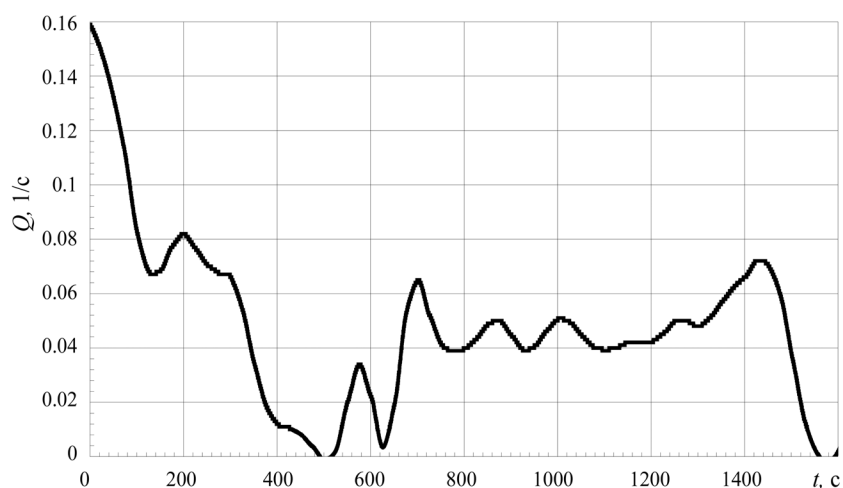


Рис. 8. Объемный расход через байпасную магистраль при захлаживании транспортного канала СПТМ

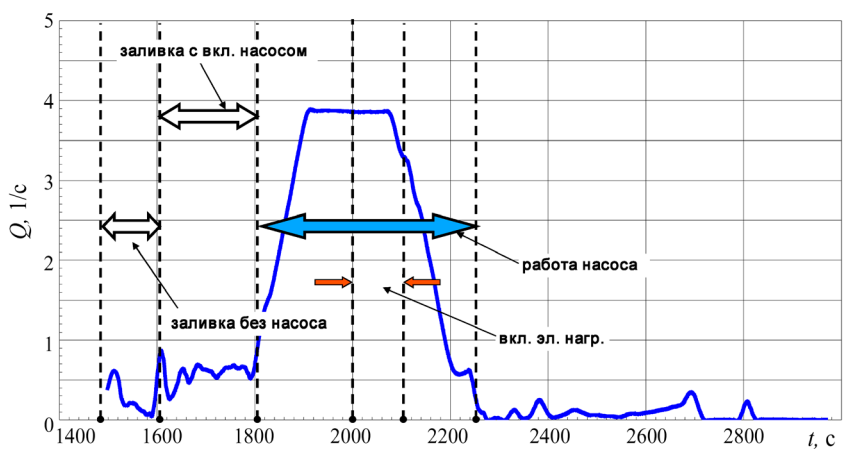


Рис. 9. Объемный расход жидкого азота через транспортный канал СПТМ при заливке магистрали и работе основного насоса

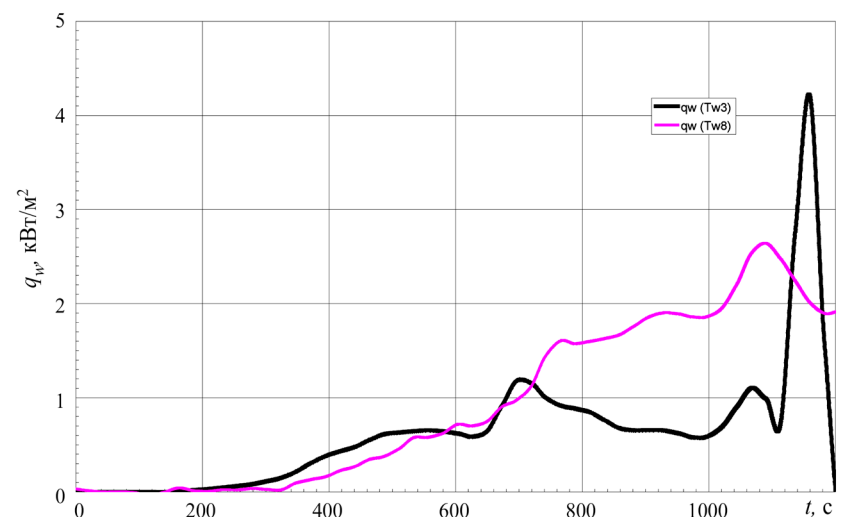


Рис. 10. Изменение плотности теплового потока при захлаживании элементов магистрали (труба диаметром 50 мм Tw8 и диаметром 30 мм Tw3)

Изменение температуры в процессе захлаживания по сечению канала (на нижней и верхней образующей) незначительно и не превышает 10 К. Только в момент наступления кризиса пленочного кипения на нижней образующей (термодатчики T_{w3} , T_{w5} на рис. 6 и термодатчики T_{w7} , T_{w8} на рис. 7) разница температур достигает 40 К. Выбранный режим захлаживания транспортного канала обеспечивает необходимую равномерность поля температур по его высоте и в значительной степени по длине [7]. На рис. 8, 9 представлены результаты измерения объемных расходов жидкого азота при захлаживании и заливке транспортных каналов. Объемный расход при захлаживании не превышает 40–60 мл/с. Только в начальный момент его величина достигает 160 мл/с. При заливке магистрали величина расхода изменяется от 0.1 до 0.6 л/с. Заливка происходит в два этапа. На первом – в течение 60 секунд без раскрутки насоса, а за тем с раскруткой насоса. Необходимость раскрутки насоса в процессе заливки вызвана требованием к обеспечению работоспособности привода насоса.

На рис. 10, 11 представлены результаты расчета плотности теплового потока при захлаживании и коэффициента теплоотдачи. Тепловой поток при пленочном кипении не превышал 2 кВт/м², а величина коэффициента теплоотдачи – 14 кВт/м² К. Эти величины тепловых потоков определяются низкой массовой скоростью дисперсного парожидкостного потока (18–20 кг/м²с). Теплоотдача в кольцевом канале транспортного канала близка к теплоотдаче в круглом канале. Это объясняется тем, что в про-

точной части кольцевого канала происходит закрутка парокapельного потока за счет дистанционирующей намотки. Увеличение массовой скорости потока при захлаживании нецелесообразно, так как может привести к существенным термическим напряжениям в СПТМ и, как следствие, разрушению сверхпроводящего кабеля.

Результаты измерения давления на входе в магистраль показывают (рис. 12), что при давлении 1 кгс/см² (изб.) перепад давления на жиклере байпасной магистрали является докритическим. Это приводит к значительным колебаниям расхода через байпасную магистраль (см. рис. 10), и возникает ситуация, когда меняется направление движения потока (с 500 по 630 секунду). В этот момент давление в магистрали за счет интенсивного парообразования превышает давление подачи.

Анализ результатов экспериментов по захлаживанию СПТМ представленный в табл. 2, показал, что при использовании жиклера диаметром 2 мм время захлаживания достигает 1300–1500 секунд. Установка жиклера диаметром 3 мм позволяет сократить это время до 1000 секунд при давлении подачи 2 кгс/см² (изб.). Уменьшение давления в этом случае с 2 до 1 кгс/см² (изб.) приводит к увеличению времени захлаживания до 1500 секунд. Изменение температуры жидкого азота с 78 до 74 К практически не изменяет время захлаживания. Таким образом, оптимальным с точки зрения обеспечения равномерного поля температур по длине транспортной магистрали СПТМ является режим работы с жиклером диаметром 2 мм и давлением подачи 2 кгс/см² (изб.).

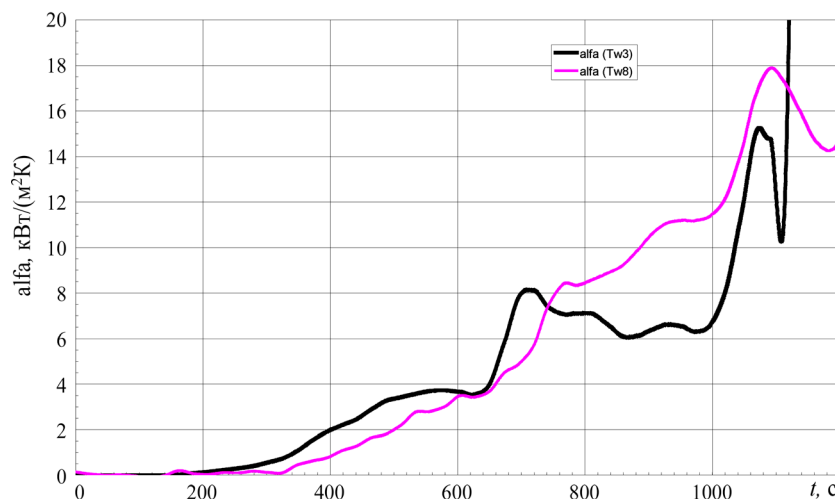


Рис. 11. Изменение коэффициента теплоотдачи при захлаживании элементов магистрали (труба диаметром 50 мм T_{w8} и диаметром 30 мм T_{w3})

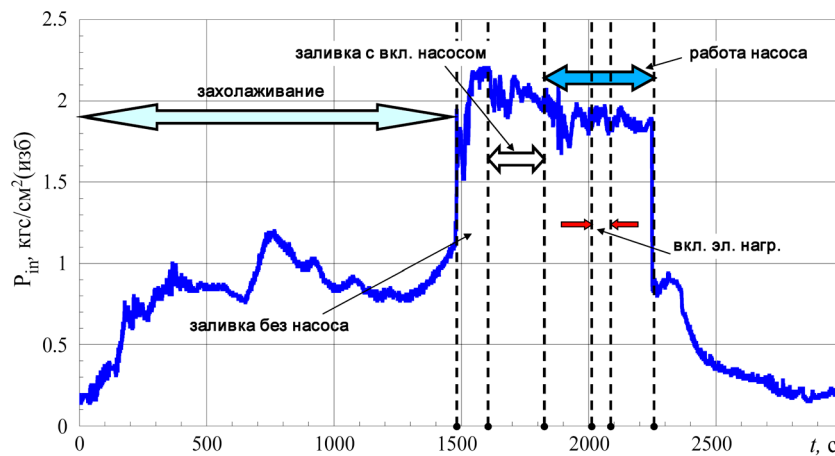


Рис. 12. Изменение давления на входе в магистраль при захлаживании и работе СПТМ

Таблица 2. Результаты экспериментов по захлаживанию макета СПТМ

№	t по T_{w8}, c	t по $T_{f out}, c$	$D_{ж}, мм$	$P_t, ат и$	Примечание
1	1500	1450	2	0.5	
2	1640	1300	2	0.5	
3	-	1570	2	0.5	переохлад. азот
4	1545	1500	2	2.05	
5	1040	986	3	2.05	
6	1207	1400	3	2..1.3	
7	916	764	3	1.5	
8	1230	1200	3	1.5	
9	1400	1425	3	1.5	
10	1350	1450	3	1	

Выводы

1. В работе предложена оригинальная конструкция макета сверхпроводящей криогенной транспортной магистрали (СПТМ) для одновременной передачи и транспортировки жидкого криогенного компонента и электрической энергии с использованием перспективных сверхпроводниковых материалов.

2. Проведены экспериментальные исследования процессов захлаживания применительно к макету СПТМ с использованием криогенной установки и универсального экспериментально-криогенного стенда, исследованы физические процессы в СПТМ и проведена отработка ряда технических решений.

3. Для интенсификации процессов захлаживания элементов СПТМ предложена высокоэффективная струйная система захлаживания и проведены экспериментальные исследования с использованием этой системы. На основе полученных экспериментальных данных выбраны оптимальные режимы по диаметру жиклера, входному давлению.

4. Получены результаты по плотностям тепловой нагрузки и коэффициентам теплоотдачи в различных элементах СПТМ в процессе захлаживания и работы.

5. Выбранные конструктивные решения, а также проведенные исследования на жидком азоте подтвердили высокую эффективность предложенной конструкции модели сверхпроводниковой транспортной магистрали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Антохов И.В., Маринин К.С., Носов А.А., Потанина Л.В., Фирсов В.П., Яковлев А.А.** Гибридные линии передачи энергии со сверхпроводящими кабелями – оптимизация термостатирования и концевых муфт // Кабели и провода. 2018. № 6 (374). С. 20–30.
2. **Фирсов В.П., Антохов И.В., Яковлев А.А., Высоцкий В.С., Носов А.А., Фетисов С.С.** Тепловые процессы в кабельных вводах сверхпроводящих линий // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. № 4. С. 164–177.
3. **Костюк В.В., Фирсов В.П.** Теплообмен и гидродинамика в криогенных двигательных установках. М.: Наука, 2015. 319 с.
4. **Костюк В.В., Благов В.С., Высоцкий В.С.** и др. Письма в журнал технической физики. 2012. Т. 38. № 6. С. 52–60.
5. **Vysotsky V., Nosov A., Fetisov S., Svalov G., Kostyuk V., Blagov E., Antyukhov I., Firsov V., Katorgin B., Rakhmanov A.** Hybrid Energy Transfer Line with Liquid Hydrogen and Superconducting MgB2 Cable – First Experimental Proof of Concept // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. June 2013. V. 23. N 3.
6. **Kostyuk V.V., Blagov E.V., Antyukhov I.V., Firsov V.P., Vysotsky V.S., Nosov A.A., Fetisov S.S., Zanev S.Yu., Svalov G.G., Rachuk V.S., Katorgin B.I.** Cryogenic design and test results of 30-m flexible hybrid energy transfer line with liquid hydrogen and superconducting MgB2 cable // Cryogenics. March 2015. V. 66. P. 34–42.
7. **Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В.** Кипение криогенных жидкостей М.: Энергия, 1977. 286 с.

Experimental study of superconducting transport lines cooling processes

V.P. Firsov¹, I.V. Antyukhov¹, V.S. Vysotsky², A.A. Nosov²,

¹ *Moscow Aviation Institute (Technical University), Moscow, 125993, Russia*

² *JSC "VNIIEP", Moscow, 111024, Russia*

e-mail: firsovval@mail.ru

The paper discusses experimental methods for studying a new method of transporting energy carriers using a hybrid power transmission line, which consists in combining pipelines for transporting liquefied cryogenic energy carriers with cable power transmission lines, which provides the necessary temperature regime for the operation of superconductors for long superconducting paths. Experiments on liquid nitrogen with a 10 m long model hybrid line confirm the validity of the decisions made. Various methods of chill-down processes and operation of the model line are considered.

Solving the problems of shortage of traditional energy carriers, environmental pollution, congestion of transport arteries is associated with the creation of systems for the simultaneous transportation of hydrogen and electrical energy using advanced superconducting materials. When using lines with liquid hydrogen, it is rational to integrate them with cable power transmission lines (HTS), made on the basis of new high-temperature superconductors (HTSC), in which there are practically no losses. To create such systems, it is necessary to experimentally confirm the efficiency of the decisions made. For research of physical processes and development of technical solutions in SPTM, a cryogenic unit SPTM and a universal cryogenic stand are used. The work performed is aimed at obtaining experimental data on the thermal and hydraulic characteristics of the SPTM during the cooling process and regular operation of the main line. SPTM consists of a transport channel and a temperature control channel. The investigated transport channel with a length of 10 m is made in the form of a main

channel with a flow section diameter of 30 mm and an annular channel formed by the main transport channel and a pipeline with a diameter of 50 mm. The main channel is used as a former for attaching the superconducting cable. Thermal processes in the transport channel are of the greatest interest in the cooling down of the HHP. When the SPTM cools down, it is necessary to ensure the uniformity of the temperature fields along its length and along the perimeter of the transport channel. The non-uniformity of the temperature fields in the transport channel can lead to serious thermal deformations leading to the destruction of the superconducting cable, since HTSC materials are extremely sensitive to mechanical deformations. The objectives of this study were: the creation of a method for cooling the transport channel of the SPTM and the experimental study of physical processes using liquid nitrogen as a model liquid in order to select the optimal parameters.

Keywords: superconductivity, liquid nitrogen, superconducting cable, cooldown time, heat fluxes, hybrid energy system, jet cryostatation system.

REFERENCES

1. **Antyukhov I.V., Marinin K.S., Nosov A.A., Potanina L.V., Firsov V.P., Yakovlev A.A.** Gibrnidnye linii peredachi ehnergii so sverkhprovodyashhimi kabelyami – optimizatsiya termostatirovaniya i kontseyvkh muft [Hy-bridge power lines with superconducting cables – optimization of thermostating and cable terminations]. *Kabeli i provoda – Cables and Wires*, 2018, no. 6 (374), pp. 20–30. In Russ.
2. **Firsov V.P., Antyukhov I.V., Yakovlev A.A., Vysotsky V.S., Nosov A.A., Fetisov S.S.** Thermal processes in cable glands of superconducting lines. *Thermal processes in technology*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 164–177. In Russ. DOI: 10.34759/tpt-2020-12-4-163-174
3. **Kostyuk V.V., Firsov V.P.** *Teploobmen i gidrodinamika v kriogennykh dvigatel'nykh ustanovkakh* [Heat transfer and hydrodynamics in cryogenic propulsion systems]. Moscow: Nauka, 2015, 319 p. In Russ.
4. **Kostyuk V.V., Antyukhov I.V., Blagov E.V., Vysotsky V.S., Katorgin B.I., Nosov A.A., Fetisov S.S., Firsov V.P.** Experimental hybrid power transmission line with liquid hydrogen and MgB₂-based superconducting cable. *Technical Physics Letters*, 2012, vol. 38, no. 3, pp. 279–282. <https://doi.org/10.1134/S106378501203025X>
5. **Vysotsky V., Nosov A., Fetisov S., Svalov G., Kostyuk V., Blagov E., Antyukhov I., Firsov V., Katorgin B., Rakhmanov A.** Hybrid energy transfer line with liquid hydrogen and superconducting MgB₂ cable – First experimental proof of concept. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, vol. 23, no. 3. DOI: 10.1109/TASC.2013.2238574
6. **Kostyuk V.V., Blagov E.V., Antyukhov I.V., Firsov V.P., Vysotsky V.S., Nosov A.A., Fetisov S.S., Zanezhin S.Yu., Svalov G.G., Rachuk V.S., Katorgin B.I.** Cryogenic design and test results of 30-m flexible hybrid energy transfer line with liquid hydrogen and superconducting MgB₂ cable. *Cryogenics*, 2015, vol. 66, pp. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2014.11.010>
7. **Grigoriev V.A., Pavlov Yu.M., Ametistov E.V.** *Kipenie kriogennykh zhidkostej* [The boiling of cryogenic liquids]. Moscow: Energiya, 1977. 286 p. In Russ.