

# Научные исследования, разработка, организация производства и внедрение системы индукционно-резистивного обогрева длинных и сверхдлинных трубопроводов.



**М. Л. Струпинский,**  
генеральный директор  
ООО «ССТ», к.т.н.,  
Почетный строитель  
России



**Н. Н. Хренков,**  
главный редактор  
журнала ПЭиЭ,  
советник генерального  
директора ООО «ССТ»,  
к.т.н.,  
член-корр. АЭН РФ



**А. Б. Кувалдин,**  
засл. деятель науки РФ,  
д. т. н., профессор каф.  
Физики электротехни-  
ческих материалов и  
Автоматизированных  
электротехнических  
комплексов НИУ МЭИ

## Уважаемые читатели!

В этом номере журнала мы начинаем публикацию серии статей, посвященных созданию в «ССТ» полностью отечественной скин-системы обогрева длинных трубопроводов ИРСН 15000, соответствующей современному уровню науки и техники. Надеемся, что эти статьи помогут нашим читателям лучше понять назначение, особенности построения и эксплуатации данного высоко технологичного и наукоемкого вида систем обогрева.

## **1** Актуальность обогрева сверхдлинных трубопроводов нефтегазоконденсатных месторождений.

### **1.1. Система «Тепломаг», обогрев внутриплощадочных трубопроводов.**

Существенное значение для экономики страны играют работы, связанные с эксплуатацией и освоением нефтегазоконденсатных месторождений, выполняемые в районах Крайнего Севера и Сибири, различными фирмами, входящими в группы компаний «Газпром», «Лукойл», «Транснефть», «Роснефть».

Эффективность работы нефтяных и газовых месторождений в экстремальных климатических условиях напрямую связана с устойчивой и безаварийной работой систем транспортировки добываемых и технологических жидкостей: газа, воды, газового конденсата, нефти. Наличие систем обогрева обеспечивает стабильность работы трубопроводных систем и технологического оборудования, повышает качество продукции, снижает риски эксплуатации нефтегазоконденсатных месторождений в экстремальных климатических условиях.

Для обогрева внутриплощадочных трубопроводов и резервуаров получили распространение системы обогрева с использованием электрических нагревательных кабелей, которые показали высокую эффективность и надежность. Широко используются и продолжают внедряться системы обогрева «ТЕПЛОМАГ», разработанные и серийно производимые ООО «Специальные системы и технологии» [1,2,3].

Системы «Тепломаг» также получили распространение на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях, таких как «Кириши-нефтеоргсинтез», «Саянскхимпласт» [4] и береговых перегрузочных комплексах [5].

Необходимость обогрева трубопроводов диктуется тем обстоятельством, что в условиях Крайнего Севера

транспортировка указанных жидкостей осложняется образованием парафиновых, ледяных и газогидратных пробок. В случае остановки по необходимости транспортировки воды по водоводам, вода может замерзнуть и разрушить трубу. Газовый конденсат и нефть при низких температурах значительно увеличивают свою вязкость, что увеличивает нагрузку на насосы, а при остановке транспортировки образуют непроходимые пробки.

Наличие системы обогрева позволяет обеспечить нормальное круглогодичное функционирование газовых, нефтяных трубопроводов и водоводов. С одной стороны системы обогрева обеспечивают стабильность технологических процессов на месторождении, а с другой, являются элементом обеспечения безопасности и повышения надежности нефтегазового оборудования и систем жизнеобеспечения.

Суммируя сказанное, перечислим основные задачи, которые решает электрообогрев трубопроводов:

- Предотвращение загустевания и замерзания транспортируемых жидкостей;
- Компенсация тепловых потерь;
- Поддержание температуры технологического процесса;
- Стартовый разогрев остановленного трубопровода.

Разработка проектов, поставка, монтаж на объектах и сервисное обслуживание систем «Тепломаг» реализуются работниками предприятий, входящих в Группу компаний «Специальные системы и технологии». Так, например, системы «ТЕПЛОМАГ» успешно функционируют более, чем на сотне нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений, обеспечивая работу внутриплощадочных трубопроводов различного назначения.

Внутриплощадочные трубопроводные системы характеризуются большой разветвленностью, разнообразием трубопроводов по размерам и длине. Характерная длина внутриплощадочных трубопроводов - де-

сятки и, в отдельных случаях, сотни метров. В качестве нагревательных элементов наибольшее распространение получили саморегулирующиеся нагревательные кабели, обладающие целым рядом достоинств. Отличительная особенность саморегулирующихся кабелей - существенная зависимость выделяемой мощности от температуры обогреваемого объекта, что резко повышает безопасность систем обогрева, упрощает проектирование и монтаж систем. При этом длина типовых саморегулирующихся нагревательных кабелей в редких случаях превышает 100 м. Важная часть систем обогрева внутриплощадочных трубопроводов на саморегулирующихся кабелях - это система подвода электропитания к ним.

Отметим, что на месторождениях обычно имеется источник электроэнергии достаточной мощности и распределительная электрическая сеть, что упрощает построение системы подачи питания.

### **1.2. Обогрев межплощадочных трубопроводов**

Доставка углеводородного сырья с удаленных площадок на центральный пункт сбора осуществляется по межплощадочным трубопроводам. Длина межплощадочных трубопроводов при этом составляет от 2-3 до 20-40 км. В условиях, когда теплое время года не превышает 3 месяцев, безопасная и надежная работа трубопроводов возможна только при условии оснащения их системами обогрева. Задача обогрева межплощадочных трубопроводов решительно отличается тем, что необходимо обогревать отдельные трубопроводы большой длины, проходящие по ненаселенной территории, на которой отсутствуют источники электроэнергии. Если использовать для межплощадочных трубопроводов традиционные схемы обогрева на основе саморегулирующихся нагревательных кабелей, то главной проблемой становится задача подачи питания к распределительным коробкам,

которые следует располагать вдоль трубопровода каждые 100-200 метров. При этом стоимость системы питания превосходит стоимость собственно нагревательных кабелей в 2-3 раза.

Общепризнанным решением обогрева сверхдлинных трубопроводов является система с использованием скин-эффекта или иначе индуктивно-резистивная система (ИРСН). Перед началом данной работы принцип индуктивно-резистивного обогрева был известен только в общих чертах, именно как принцип.

В России отсутствовали инженерные методики расчета характеристик скин-систем, таких как линейная мощность, напряжение питания, рабочий ток в зависимости от размеров и характеристик элементов и в зависимости от длины трубопровода.

Первоначально скин-систему обогрева трубопроводов в конце 70-х годов прошлого столетия предложила и реализовала японская фирма «Чиссо» [6,7]. Однако, в их публикациях давалось только самое общее описание системы, которое не могло служить основой для проектирования.

Система индукционно-резистивного обогрева трубопроводов, называемая также скин-системой в иностранных источниках именуется как SECT система (skin electric current thermosystem) или SENT (skin electric heating \*\*\*). В отечественной литературе возможность применения скин-систем для обогрева трубопроводов упоминалась в [8,9].

В районе 2000 года на российском рынке систем обогрева трубопроводов появились предложения американской фирмы Райхэм (Тайко) по скин-системам обогрева. Информация была представлена в каталогах фирмы в самом общем виде, также без каких либо указаний на критические параметры системы.

На рубеже 80-90-х годов в СССР были построены первые опытные скин-системы обогрева трубопроводов, которые, однако, базировались не на специально созданных, а на серий-

ных изделиях общепромышленного применения. Из-за отсутствия проработанной научной базы и специализированных изделий длина этих трубопроводов не превышала 2 км. Системы отличались низкой надежностью и не получили сколько-нибудь широкого применения. А к 2000 году в России не было ни одной действующей системы и опыт проектирования был утерян.

Можно констатировать, что перед началом данной работы способ обогрева длинных трубопроводов на основе скин-эффекта в России был известен только в общих чертах.

## 2. Основная научно-техническая идея индуктивно-резистивной системы (скин-системы) обогрева трубопроводов

### 2.1. Принципиальная схема скин-системы обогрева.

Индуктивно-резистивная система (скин-система) содержит нагреватели, состоящие из высоковольтного кабеля достаточно большого сечения, помещенного в ферромагнитную (стальную) трубу (рис.1 и 2). На переднем конце такой линии подается питающее напряжение, а на дальнем конце жила кабеля и труба соединяются накоротко.

За счет тока, протекающего по кабелю, в жиле кабеля выделяется тепловая энергия согласно закона Джоуля-Ленца. В обратную сторону ток протекает по ферромагнитной трубке. Взаимодействие электромагнитных полей внутреннего и внешнего проводников порождает следующие эффекты.

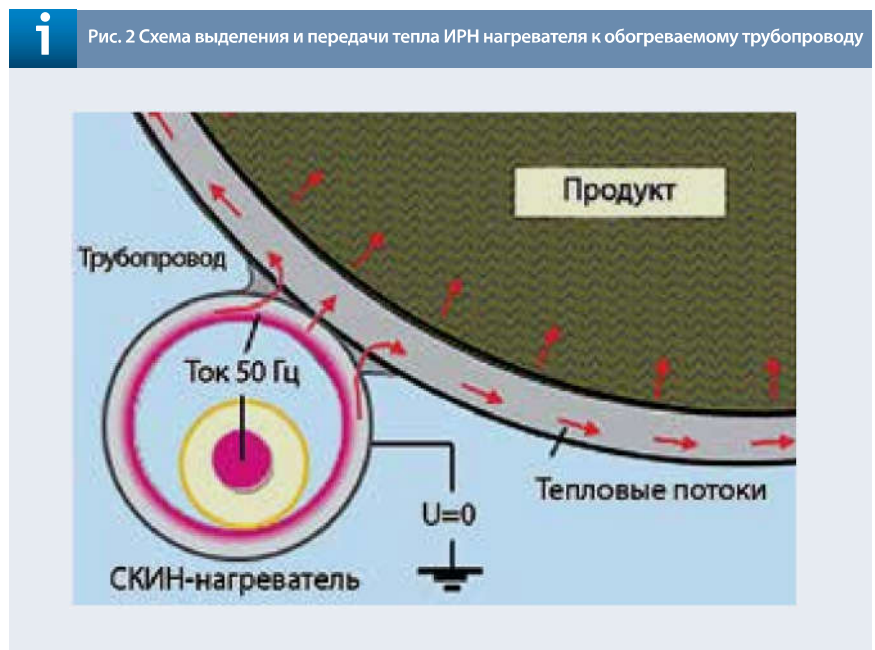
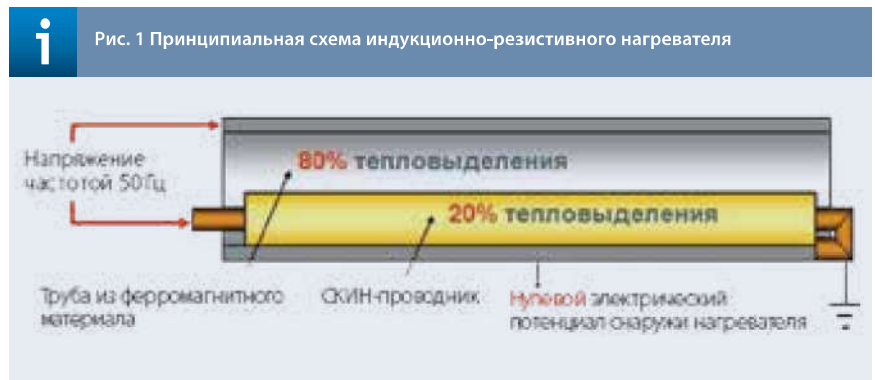
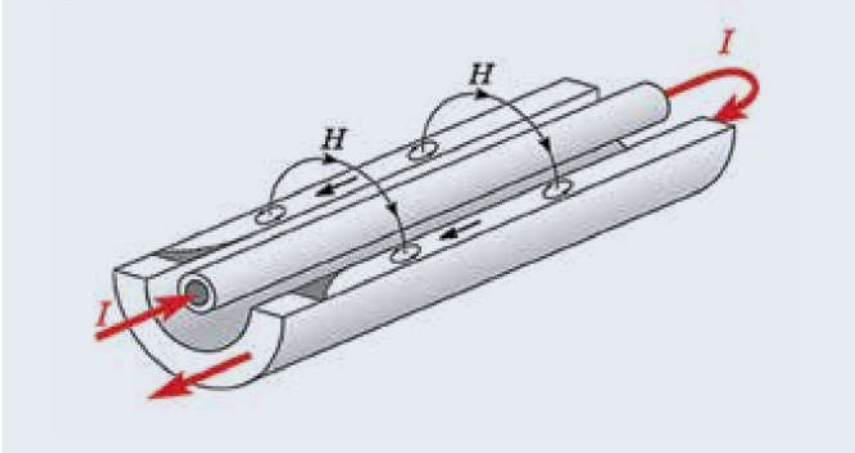




Рис. 3 Структура электромагнитного поля в индуктивно-резистивном нагревателе



При правильном подборе таких параметров как значение тока, значения питающего напряжения и падения напряжения на единицу длины, в стенке ферромагнитной трубки, даже на частоте 50 Гц, реализуется полноценный скин-эффект. За счет этого в стальной трубке ток протекает только около внутренней поверхности (рис. 2 и 3). При этом толщина стенки трубки должна превышать глубину проникновения электромагнитного поля примерно в 3 раза.

При соблюдении указанных условий на внешней поверхности трубки электрический потенциал практически отсутствует. Поскольку толщина скин-слоя невелика, его сопротивление заметно превосходит сопротивление внутреннего проводника, обычно выполняемого из меди, и в стальной трубке выделяется до 80 % общего теплового потока.

## 2.2. Достоинства скин-систем обогрева.

Как следует из приведенного описания и рис.1, подобный скин-нагреватель одновременно выполняет роль питающей линии, что позволяет обогревать длинные трубопроводы, подавая питание только из одной точки.

Правда возникает необходимость использования высоковольтного кабеля и остального высоковольтного оборудования, что диктуется необходимостью обогревать длин-

ные трубопроводы. Типовое значение линейного падения напряжения в нагревателе данного типа составляет 0,25-0,40 В/м. Если вся система спроектирована в расчете на питающее напряжение 5000 В, то это позволяет из одной точки обогревать трубопровод длиной до 20 км. Если из средней точки подать питание на два плеча, то реализуется обогрев трубопровода длиной 40 км.

Благодаря тому, что внешний проводник скин-системы – это стальная достаточно толстостенная трубка, обеспечивается высокая механическая прочность и защищенность электрической изоляции внутреннего проводника.

С другой стороны, нулевой потенциал на наружной поверхности нагревателей делает скин-систему электрически безопасной. Поэтому, скин-нагреватель прокладывается непосредственно по поверхности обогреваемого трубопровода и может быть заземлен в любой точке. Данное свойство – одно из условий применения скин-системы обогрева во взрывоопасных зонах.

## Заключение

Указанные положительные свойства скин-систем обогрева, особенности их расчета, требования к элементам конструкции как самого нагревателя так и ко всей системе в целом, стали понятны только в ходе исследовательских и конструкторских работ, прове-

денных в ССТ, что позволило создать отечественную скин-систему обогрева длинных трубопроводов, получившую наименование индуктивно-резистивная система ИРСН 15000.

О результатах данных работ, о внедрении ИРСН 15000 будет рассказано в следующих статьях данного цикла. [Пэ](#)



## Литература:

1. Хренков Н.Н. ТЕПЛОМАГ – обогрев трубопроводов и резервуаров. «Oil@ Gas Eurasia», 2002, №2.
2. Струпинский М.Л., Хренков Н.Н. Системы «ТЕПЛОМАГ» для перспективных проектов нефтегазового комплекса. «Территория НЕФТЕГАЗ» 2007, № 11, с.68-69.
3. Струпинский М.Л. Хренков Н.Н. Расчет мощности систем обогрева трубопроводов. «Трубопроводный транспорт [теория и практика]» 2008, № 1(11) с.078 – 083.
4. Постников А.Л., Малахов С.А. Опыт компании «ССТЭлектромонтаж» по оборудованию объектов Куришского НПЗ системами электрообогрева. «Промышленный электрообогрев и электроотопление», 2012, №4, с. 20 – 25.
5. Дегтярев М.А. Комплексный подход к реализации проекта на примере Таманского перегрузочного комплекса. «Промышленный электрообогрев и электроотопление», 2012, №2, с. 24 – 28.
6. Ando Masao. Apparatus for maintaining liquid being transported in a pipe line at elevated temperature. Patent USA № 3293407, опубли. 20.12.1966, заявлен 07.11.1963, приоритет от 17.11.1962
7. Ando M. Electric heating of pipeline with skin current //Elektrowärme Int. 1971. Bd. 29 №1, s. 36-37
8. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев магнитной стали на промышленной частоте. Итоги науки и техники, Электротехнология, т. 2. - М.: ВИНТИ. 1976, - 82 с.
9. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 200 с.

# Научные исследования, разработка, организация производства и внедрение системы индукционного резистивного обогрева длинных и сверхдлинных трубопроводов



**М. Л. Струпинский,**  
генеральный директор  
ООО «ССТ», к.т.н.,  
Почетный строитель  
России



**Н. Н. Хренков,**  
главный редактор  
журнала ПЭиЭ,  
советник генерального  
директора ООО  
«ССТ», к.т.н.,  
член-корр. АЭН РФ



**А. Б. Кувалдин,**  
засл. деятель науки РФ,  
д. т. н., профессор каф.  
Физики электротехни-  
ческих материалов и  
Автоматизированных  
электротехнических  
комплексов НИУ МЭИ



---

Мы продолжаем публикацию серии статей, посвященных созданию в «ССТ» отечественной skin-системы обогрева длинных трубопроводов ИРСН 15000, соответствующей современному уровню науки и техники. Надеемся, что эти статьи помогут нашим читателям лучше понять назначение, особенности построения и эксплуатации данного высокотехнологичного и наукоемкого вида систем обогрева.

---

## Основные научные достижения, обеспечившие реализацию ИРСН системы обогрева сверхдлинных трубопроводов в условиях Крайнего Севера.

До начала работ по данному направлению был выполнен анализ опубликованной отечественной и зарубежной информации, который показал, что доступны только принципиальные описания данной системы. Готовых инженерных методик расчета электрических параметров системы обогрева методом скин-эффекта не существовало.

Отсутствовали конструкторские решения по всем элементам системы таким как: длинномерный высоковольтный нагреватель, соединительные и питающие коробки, специальные источники питания, пригодные для работы в условиях Крайнего Севера. Совершенно отсутствовали какие-либо указания о построении системы контроля параметров и управления обогревом сверхдлинных трубопроводов при отсутствии электрической сети вдоль трубопровода. Все перечисленные задачи и целый ряд более мелких сопутствующих задач были исследованы теоретически и экспериментально, что позволило отработать надежные методики расчетов, создать методы проектирования подобных систем, разработать полный комплект конструкторской, методической и эксплуатационной документации.

Потребовалось также разработать методику монтажа системы обогрева и создать набор оборудования и приспособлений, обеспечивающих качественный монтаж. Весь комплекс перечисленных работ выполнен при полном отсутствии каких-либо указаний в нормативной документации и в литературе.

### Объем выполненных исследований

В рамках данной работы разработаны методы расчета и моделирования электрических и тепловых характеристик индуктивно-резистивной

системы обогрева, позволившие с высокой точностью конструировать системы обогрева трубопроводов длиной до 40 и более километров.

**1** На основе исследований электромагнитных и тепловых процессов, имеющих место в скин-системе при протекании переменных токов, разработана методика расчета электрических и тепловых параметров системы обогрева сверхдлинных трубопроводов, использующих коаксиальные индуктивно-резистивные нагреватели.

**2** Методика расчета электрических и тепловых параметров системы обогрева сверхдлинных трубопроводов, использующих коаксиальные индуктивно-резистивные нагреватели разработана благодаря содружеству специалистов ГК «ССТ» и Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт». Методика неоднократно проверялась и в настоящее время служит основным инструментом расчета электрических и тепловых параметров систем. Существо этих методик изложено в работах [1, 2, 3, 4, 5].

Методика оформлена в виде удобной программы, позволяющей выполнить варианты расчета, в зависимости от одного из изменяемых параметров. Могут варьироваться следующие показатели: сечение жилы скин-кабеля, размер скин-трубы, величина протекающего тока, длина трубопровода. По результатам расчета определяются активная линейная мощность, полная мощность системы, напряжение питания, величина тока, соответствующего требуемой линейной мощности обогрева. По результатам расчетов определяются линейная активная и реактивная мощность, полная мощность системы, напряжение питания. Пример результата расчета характеристик скин-системы обогрева водовода диаметром 159 мм и длиной 13200 м показан на рис. 1.

**3** Выполнен большой объем экспериментальных исследований на физических моделях с целью проверки методики расчета электрических характеристик. В результате расчетные значения, полученные по разработанным

методикам, и измеренные на реальных действующих объектах отличаются не более чем на 5%. Для проведения экспериментальных исследований параметров скин-систем создан и функционирует лабораторный стенд, на котором проверяются новые варианты систем скин-обогрева. С использованием указанной выше методики исследованы зависимости линейной мощности системы и питающего напряжения от длины трассы (рис. 2). Характерные графики зависимостей имеют нелинейный характер, который связан с ограничениями по теплостойкости и максимально допустимому питающему напряжению скин-кабеля, а также зависят от сечения жилы этого кабеля.

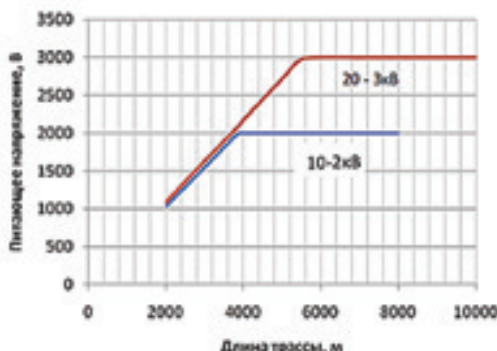
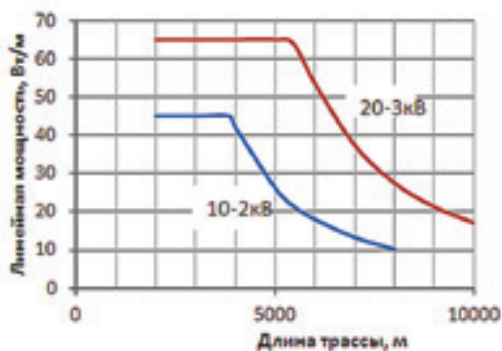
На рисунке показаны расчетные зависимости между линейной мощностью, питающим напряжением и длиной обогреваемого трубопровода. Приведены данные для случая, когда применен скин-кабель (ИРП) с полиэтиленовой сшитой изоляцией (Т максимальная рабочая 90°C) и жилами сечением 10 и 20 мм<sup>2</sup>. В качестве внешнего проводника нагревателя (ИРН) предусмотрено использование стальных трубок из стали 10 наружным диаметром 32 мм и стенкой 3 мм. Изоляция кабеля с жилой 10 мм<sup>2</sup> рассчитана на максимальное питающее напряжение 2000 В, а кабеля с жилой 20 мм<sup>2</sup> на напряжение 3000 В. На обогреваемой трубе поддерживается температура около 40°C, а изоляция кабеля нагревается до температуры не выше 75°C.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ИРСН

Сечение ИРН (проводника), мм <sup>2</sup> .....	15
Тип изоляции ИРН (проводника).....	ПЭ
Материал гофрированной трубки.....	мет
Диаметр ИРН (трубки), мм.....	32
Толщина стенки трубки, мм.....	3
Длина ИРСН, м.....	13200
Поддерживаемая температура объекта, °С.....	6
Частота тока, Гц.....	50
Ток, А.....	63,04
Напряжение питания ИРСН на метр длины, В/м.....	0,295
Активная мощность в проводнике на метр длины, Вт/м.....	4,85
Активная мощность в трубе на метр длины, Вт/м.....	12,5
Активная мощность ИРСН на метр длины, Вт/м.....	17
Реактивная мощность в проводнике на метр длины, вар/м.....	0,102
Реактивная мощность в трубе на метр длины, вар/м.....	7,04
Реактивная мощность в зазоре на метр длины, вар/м.....	0,445
Реактивная мощность ИРСН на метр длины, вар/м.....	7,58
Коэффициент мощности ИРСН.....	0,913
Напряжение на поверхности ИРСН на метр длины, В/м.....	0,0172
Напряжение питания ИРСН на всю длину системы, В.....	3900
Активная мощность ИРСН на всю длину системы, кВт.....	224,6
Реактивная мощность ИРСН на всю длину системы, квар.....	100,1
Полная мощность ИРСН на всю длину системы, кВА.....	245,9
Активное сопротивление ИРСН на всю длину системы, Ом.....	56,5
Реактивное сопротивление ИРСН на всю длину системы, Ом.....	25,2
Полное сопротивление ИРСН на всю длину системы, Ом.....	61,9
Индуктивность ИРСН на всю длину системы, Гн.....	0,0802
Напряжение на поверхности ИРСН на всю длину системы, В.....	228
Температура проводника, °С.....	14,9
Температура трубки, °С.....	7,22

Графики имеют две характерных области: в начальной части нет зависимости мощности от длины, так как здесь ограничивающим фактором выступает предельно допустимая температура (75°C) поверхности изоляции кабеля ИРП. Соответствующий этим условиям максимальный ток в жиле составляет 93 А у кабеля сечением 10 мм<sup>2</sup> и 132 А у кабеля сечением 20 мм<sup>2</sup>. В начальной зоне (при относительно малых

**Рис. 1.** Пример результатов расчета характеристик скин-системы обогрева водовода диаметром 159 мм, длиной 13200 м, по программе, созданной в ходе данной работы.



**Рис. 2.** Зависимость линейной мощности и питающего напряжения от длины трассы. Скин-системы обогрева, использующие ИРП кабели с ПЭ сшитой изоляцией. Т макс = 75°C.



длина) питающее напряжение меньше предельно допустимого. Зависимость питающего напряжения от длины трассы показана на рис. 2 б.

После того, как значение питающего напряжения сравнивается с предельным, имеет место переход во вторую зону, в которой наблюдается существенная зависимость линейной мощности от длины трассы. Во всей второй зоне питающее напряжение постоянное и равное предельно допустимому. Именно величина питающего напряжения ограничивает максимально возможную линейную мощность системы. Точка перегиба для кабеля сечением 10 мм<sup>2</sup>, с  $U_{\text{пит макс}} = 2000$  В, приходится на длину 3850 м, а для кабеля сечением 20 мм<sup>2</sup>, с  $U_{\text{пит макс}} = 3000$  В, приходится на длину 5450 м. Исследования особенностей электромагнитного поля в скин-нагревателях продолжены в работах [7,8].

**4** Энергетические параметры скин-системы существенно зависят от магнитных свойств используемых стальных труб. С целью выработать требования к трубам и исследовать влияние их предыстории на свойства, предложена оригинальная методика, по которой исследованы магнитные свойства

технических стальных труб. Эти эксперименты позволили уточнить известные по литературным источникам данные по магнитной проницаемости технической стали (рис. 3). По результатам исследований рекомендовано использовать для систем ИРСН бесшовные горячедеформированные трубы с минимальным содержанием углерода [6]. В дальнейшем данная методика использовалась при входном контроле стальных труб для скин-систем.

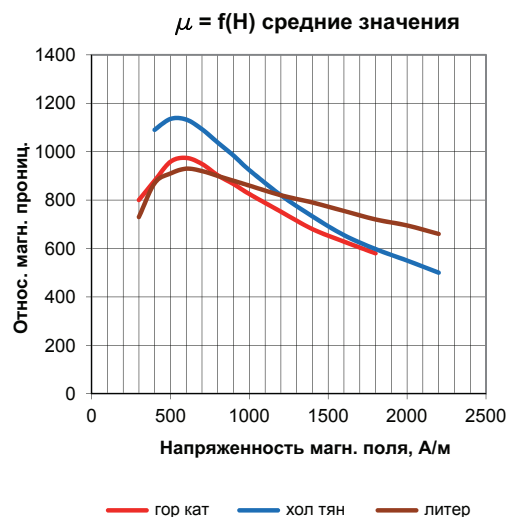
**5** Расчет электрических характеристик тесно связан с тепловыми режимами функционирования трубопровода. Созданный в ходе данной работы программный комплекс «Тепломаг» позволяет выполнить соответствующие расчеты с целью минимизации мощности ИРСН системы обогрева (рис. 4). С помощью программного комплекса «Тепломаг» достаточно точно рассчитываются значения тепловых потерь при прокладке трубопровода над землей (в воздухе), в земле и в воде [9]. Могут быть также рассчитаны: время охлаждения трубопровода до критической температуры при отключении системы обогрева и время разогрева остановленного трубопровода.

**6** Может быть определено влияние системы обогрева на температуру протекающей жидкости в зависимости от расхода, условий окружающей среды и свойств жидкости. Для выполнения расчета требуется внести исходные данные из опросного листа. Программа содержит 4 справочника с данными по свойствам металлов, теплоизоляционных материалов, транспортируемых жидкостей, воздуха и нескольких типов грунта.

**7** Существенная часть исследований была связана с обеспечением надежности и длительных сроков эксплуатации высоковольтных скин-кабелей. В системе ИРСН структура электрического поля, воздействующего на изоляцию скин-кабеля, значительно отличается от структуры поля обычного высоковольтного силового кабеля. Между изоляцией скин-кабеля и заземленной скин-

Рис. 3.

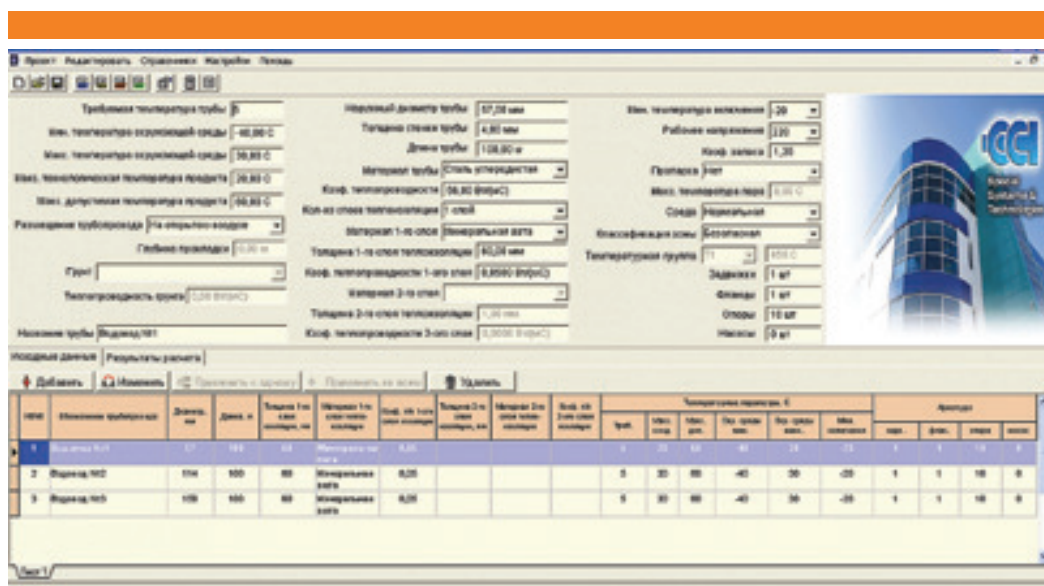
Сравнение средних экспериментальных значений магнитной проницаемости горячекатаных и холоднотянутых стальных труб с литературными данными.



трубой находится воздушный промежуток. Он опасен тем, что здесь может развиваться коронный разряд, постепенно приводящий к разрушению электрической изоляции. На основе этих исследований выработаны рекомендации по конструкции электрической изоляции скин-кабелей.

## Заключение

Результаты перечисленных выше исследований явились научной основой серийного производства отечественных скин-систем. Они реализованы в виде программных средств и проектных решений, о которых будет рассказано в следующих публикациях.



**Рис. 4.** Программа «Тепломаг» Лист внесения исходных данных и результатов расчета тепловых потерь.

## Литература

- Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Кувалдин А. Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой области. Справочная книга. – Москва - Вологда; Изд-во «Инфра – Инженерия», 2015. – 272 с.
- Кувалдин А. Б., Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Шатов В. А. Электротепловая модель коаксиальной индукционно-резистивной системы нагрева // Электротехника, № 1, 2005. с. 48–53.
- Kuvaldin A. B., Strupinskiy M. L., Khrenkov N. N., Shatov V. A. Electrothermal model of coaxial inductive-resistive heating system / Russian Electrical Engineering, Vol. 76, No. 1, pp. 51–56, 2005. © Allerton Press, Inc., 2005.
- Кувалдин А. Б., Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Шатов В. А. Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных проводящих средах // Электричество, № 11, 2005. с. 56–61.
- Струпинский М. Л., Кувалдин А. Б. Индукционно-резистивная система обогрева трубопровода. // «Электрика», № 11, 2008. с. 21–24.
- Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Тюлюканов В. Д. Промышленный обогрев протяженных трубопроводов с помощью скин-системы. Электротехнический портал ELEC.RU раздел «Публикации/Статьи, обзоры» опубликовано 20.05.2010.
- Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Кувалдин А. Б., Метод определения электрофизических свойств стальных труб / Электротехника, № 8, 2009, с. 55–60.
- Strupinskiy M. L., Khrenkov N. N., Kuvaldin A. B., Technique for determining electrophysical properties of steel pipes / Russian Electrical Engineering, 2009, Vol. 80, No. 8, pp. 466–471. ISSN 1068-3712. © Allerton Press, Inc., 2009.
- Кувалдин А. Б., Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Федин М. А. Расчет электрических и энергетических характеристик стержневого индуктора для нагрева ферромагнитной загрузки / Электричество, № 10, 2009. С. 54–61.
- Кувалдин А. Б., Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Федин М. А. Моделирование электромагнитного поля в ферромагнитной стали при индукционном, электроконтактном и комбинированном нагреве. «Индукционный нагрев» 2010, №13, с. 15–19.
- Хренков Н. Н., Дегтярева Е. О. Расчет режимов остывания и разогрева трубопроводов. «Промышленный электрообогрев и электроотопление» 2011. № 2, с. 20–23.



**М. Л. Струпинский,**  
генеральный директор ООО «ССТ», к.т.н., Почетный строитель России



**Н. Н. Хренков,**  
главный редактор журнала ПЭиЭ, советник генерального директора ООО «ССТ», к.т.н., член-корр. АЭН РФ



**А. Б. Кувалдин,**  
засл. деятель науки РФ, д. т. н., профессор каф. Физики электротехнических материалов и Автоматизированных электротехнических комплексов НИУ МЭИ

# Научные исследования, разработка, организация производства и внедрение системы индукционно-резистивного обогрева длинных и сверхдлинных трубопроводов (3 часть)

Представляем третью из серии статей, посвященных созданию в «ССТ» полностью отечественной скин-системы обогрева длинных трубопроводов ИРСН 15000, соответствующей современному уровню науки и техники. Система ИРСН 15000 обеспечивает полное импортозамещение аналогичных систем, предлагаемых зарубежными компаниями. Надеемся, что серия статей, дающих обстоятельное описание скин-системы обогрева, поможет нашим читателям лучше понять назначение, особенности построения и эксплуатации данного высокотехнологичного и наукоемкого вида систем обогрева.

Рис. 1. Внешний вид высоковольтных кабелей, используемых в скин-системах обогрева.



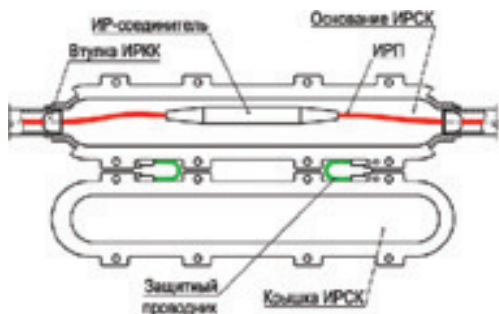
Рис. 2. Внешний вид собранного соединителя ИРС-Т; предельная температура 80°C.



Рис. 3. Внешний вид собранного соединителя ИРС-Л; предельная температура 180°C.



Рис. 4. Открытая соединительная коробка ИРСК, в которой смонтирован соединитель ИРС-Л.



## Объем конструкторских и технологических разработок

В процессе реализации проекта создания российской скин-системы специалистами ГК «ССТ» был выполнен большой объем конструкторских и технологических разработок, позволивших создать и наладить производство всех элементов системы обогрева.

**1** Созданы специальные высоковольтные кабели оригинальной конструкции, нормальной и повышенной теплостойкости. Отработаны конструкция и технология изготовления скин-кабелей, устойчивых к условиям монтажа и эксплуатации. Налажено серийное производство скин-кабелей (рис. 1) кабельным производством ГК «ССТ».

**2** Поскольку отдельные отрезки скин-кабелей необходимо сращивать в единую цепь, то существенную роль в надежности системы играют высоковольтные кабельные соединители. Были разработаны и налажено серийное производство специализированных высоковольтных соединителей для скин-кабелей (рис. 2 и 3) и отработана технология их монтажа в полевых условиях.

**3** Разработаны конструкции питающих, соединительных и концевых коробок во взрывобезопасном исполнении, обеспечивающие надежную работу системы в жестких климатических условиях Крайнего севера. Типовая конструкция соединительных коробок ИРСК, служащих для удобства протяжки скин-кабеля внутри стальной трубки и размещения высоковольтных соединителей показана на (рис. 4 и 5). Организовано серийное производство соединительных коробок, так как на каждом километре трассы устанавливается 14-15 коробок.

Коробки отличаются небольшими поперечными размерами, что позволяет размещать их под тепловой изоляцией. Данное решение минимально влияет на увеличение тепловых потерь и сохраняет целостность кожуха теплоизоляции.

Концевые коробки не отличаются от соединительных по внешнему виду, но имеют специальные контакты для соединения внутреннего и внешнего проводников и для заземления (рис. 6).

**4** Как транспортные трубы, так и трубки для скин-систем серийно изготавливаются длиной, в среднем, 12 м. Следовательно, в местах стыка транспортной трубы необходимо выполнить соединение скин-трубок. Как указывалось выше, примерно каждые 70 м устанавливаются соединительные коробки ИРСК. Отработана конструкция узлов стыковки, для чего применяются «пеналы» и втулки, привариваемые сплошным кольцевым швом. Пример узла стыковки скин-трубки в зоне стыка транспортной трубы показан на рис. 7.

Далеко не всегда удается обеспечить плотный контакт между обогреваемой трубой и скин-нагревателем. Как видно из рис. 7, в зоне стыка транспортной трубы этому мешают сварочный шов на транспортной трубе и соединительные втулки. На компенсаторах и отводах тоже не всегда удается достичь плотного контакта.

С целью улучшить передачу тепла от нагревателя к обогреваемому объекту, в ходе работ по созданию системы ИРСН 15000 были разработаны состав и технология производства теплопроводящей пасты. Налажено производство пасты, получившей наименование Silarm, в промышленных объемах [1]. Применение теплопроводящей пасты позволило предотвратить перегрев высоковольтной изоляции скин-кабеля и, одновременно, повысить к.п.д. обогрева в зонах вынужденного нарушения теплового контакта между транспортной трубой и скин-нагревателем (рис. 8).

**5** Используемые в скин-системе стальные трубки выполняют роль обратного проводника, направляющего канала для протяжки скин-кабеля и его защитной оболочки. В соответствии с проведенными исследованиями, о которых рассказано в статье [2], выработаны технические требования, которым должны



Рис. 5. Внешний вид соединительной коробки ИРСК

Рис. 6. Открытая концевая коробка ИРСК, в которой выполнено соединение скин-кабеля и коробки с обратным проводником

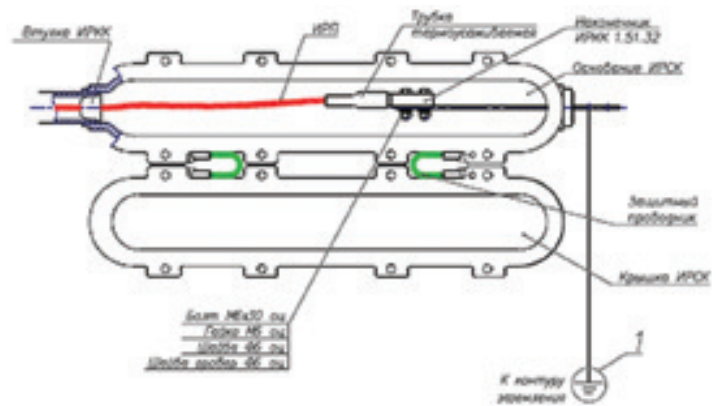


Рис. 7. Соединение скин-трубки в зоне стыка транспортной трубы.

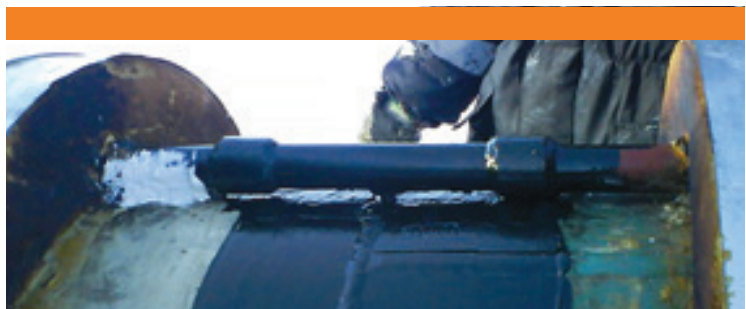


Рис. 8. Заполнение зазора между скин-нагревателем и транспортной трубой теплопроводящей пастой Silarm белого цвета.

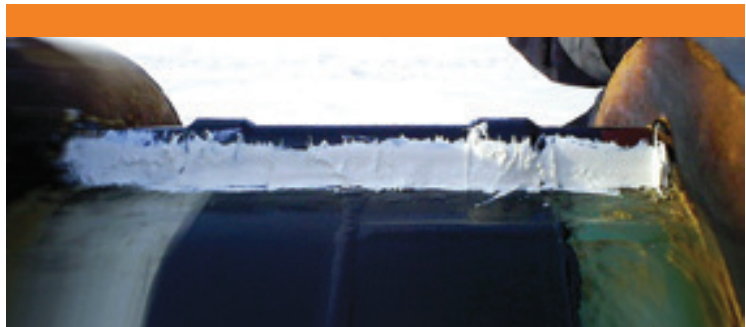


Рис. 9. Обработка трубок ИРН



Рис. 10. Специализированный трансформатор для питания скин-системы обогрева на Заполярном НГКМ



Рис. 11. Внешний вид КТП для питания скин-системы обогрева



соответствовать трубки. Отработана технология обработки скин-труб, обеспечивающая стабильные электрические характеристики и монтаж скин-кабеля без повреждений (рис. 9).

**6** Система ИРСН 15000 реализуется в виде однофазной или двухфазной нагрузки значительной мощности. Например, в системах ИРСН Заполярного ГНКМ обогрев трубопроводов реализован в виде двух параллельных ниток, следовательно, мы имеем двухфазную нагрузку. Системы ИРСН Песцового месторождения представляют собой однофазную нагрузку, так как выполнены в виде одной нитки обогрева. Поэтому, в ходе разработки скин-системы обогрева возникла необходимость разработки таких схем питания, которые позволяют согласовывать первичную трехфазную сеть с двухфазной или однофазной нагрузкой, что исключительно важно при дизель-генераторном источнике ограниченной мощности, чаще всего используемом на месторождении. Для обеспечения симметрирования двухфазных и однофазных нагрузок по отношению к трехфазному источнику питания разработаны конструкции и освоено производство питающих трансформаторов, ранее не выпускавшихся в России (рис. 10). Оригинальные схемы соединения обмоток трансформаторов защищены патентами [3,4].

**7** Вторая проблема источника питания связана с тем, что каждый трубопровод имеет характерную только для него длину, размеры, величину тепловых потерь. В результате, для компенсации тепловых потерь конкретного трубопровода требуется снабжать систему обогрева источником питания на нестандартное напряжение. Практически всегда напряжение, питающее скин-систему, не совпадает со стандартным рядом напряжений: 1, 3, 6 кВ. Так для питания скин-систем, обогревающих нефтепровод на Новопортовском месторождении, потребовалось разработать и изготовить трансформаторы на напряжения: 3922, 3906, 3264, 1184 В. Аналогичная ситуация имеет место и на других

действующих скин-системах. Кроме того, в конструкции трансформаторов предусмотрена возможность корректировки питающего напряжения в пределах  $\pm 10\%$ , что позволяет обеспечить подстройку системы в случае незначительного отклонения длины реального трубопровода от проектной документации.

**8** Были разработаны методы конструирования специальных питающих подстанций для скин-систем обогрева, к тому же приспособленных для работы в экстремальных условиях Крайнего Севера. Каждая питающая подстанция, выполняется по индивидуальному проекту (рис. 11), но на основе типовой схемы. На рис. 12 показана структура и элементы оборудования, входящего в состав питающей подстанции.

В конструкции подстанции учтены все пожелания службы эксплуатации и созданы условия для комфортной работы персонала и надежного функционирования оборудования в зимних условиях Крайнего Севера.

Отсеки КТП, кроме трансформаторного, снабжены местным электрообогревом для поддержания температуры  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в дежурном режиме и  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  в присутствии обслуживающего персонала.

Комплектная трансформаторная подстанция представляет единую утепленную конструкцию, габаритные размеры которой позволяют транспортировать ее любым видом транспорта (автомобилем, железной дорогой и вертолетом). Оболочка блок - бокса КТП выполнена из панелей типа СЭНДВИЧ толщиной 100 мм, в которых в качестве утеплителя используется полужесткая плита из базальтового волокна. КТП поставляются в полной заводской готовности, тем самым сокращается время монтажа и пуска системы электрообогрева в эксплуатацию.

**9** Отработана компьютеризованная система управления процессом обогрева, которая также обеспечивает контроль за безопасной работой трубопровода. Система управления подстраивает уровень обогрева под реальные условия окружающей среды и, за счет этого

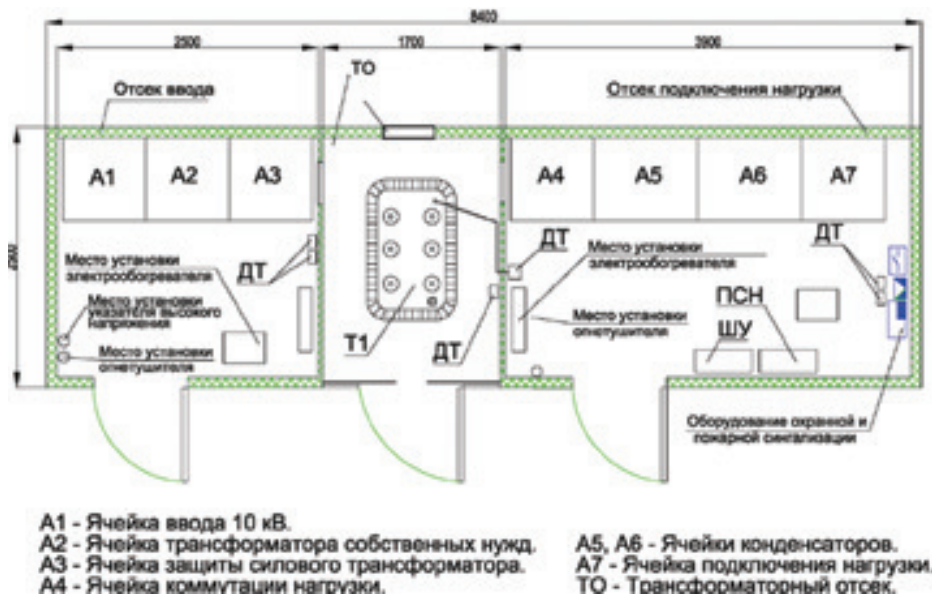


Рис. 12. Типовая планировка комплектной трансформаторной подстанции, питающей скин-систему обогрева.



Рис. 13.  
Терморегулятор РТ 420



Рис. 14.  
Терморегулятор РТ 400



оптимизирует расход электроэнергии на обогрев. Система управления обогревом существенно зависит от схемы функционирования трубопровода. Обычно используются две основные схемы:

- 1) полная компенсация тепловых потерь, т.е. поддержание на всей длине трубопровода той температуры, которую жидкость имеет на входе в трубопровод;
- 2) поддержание на трубопроводе минимально допустимых температур, которые обеспечивают его проходимость.

Кроме того, необходимо учитывать сезонные и суточные колебания температуры, чтобы обеспечить с одной стороны устойчивую работу системы, а с другой предотвратить возможные перегревы.

Системы ИРСН оснащены системами управления, построенными на программируемых микропроцессорах и терморегуляторах, производимых «ССТ» (рис. 13 и 14). Система управления контролирует температуру обогреваемого трубопровода, температуру воздуха, температуру нагревателей, параметры системы питания. Обеспечивает коммутацию нагрузки и защиту от токов перегрузки и токов короткого замыкания.

Терморегулятор РТ 420 предназначен для измерения температуры и управления процессом поддержания заданной температуры по двум каналам. Область применения – для систем промышленного обогрева трубопроводов, резервуаров, всевозможных емкостей.

Терморегулятор РТ 400 предназначен для измерения температур по 4 каналам и управления процессом поддержания заданной температуры. Регулятор обеспечивает возможность измерения температуры с помощью набора измерительных датчиков. Область применения – в системах промышленного электрообогрева. Более подробные данные о промышленных терморегуляторах производства ГК «ССТ» приведены в [5]. Вид шкафа управления показан на рис. 15.

**Каждая** поставленная заказчику система **сопровождается полным комплектом конструкторской и эксплуатационной документации** (ТУ, сертификаты, проектные чертежи и схемы, инструкции по монтажу, пуско-наладке и эксплуатации), необходимой в процессе монтажа, пуско-наладки и последующей эксплуатации. Опыт проектирования скин-систем обобщен в альбоме типовых решений, созданном в «ССТ».

**10** В процессе разработки проектной документации было налажено взаимодействие с проектными организациями, в особенности с ВНИПИгаздобыча, поскольку постоянно требовалось согласовывать параметры системы обогрева, схемы и линии подачи питания, конструкции особо сложных узлов – таких как проходы над дорогами и водными преградами.

**11** Каждая поставленная заказчику система сопровождается полным комплектом конструкторской и эксплуатационной документации (ТУ, сертификаты, проектные чертежи и схемы, инструкции по монтажу, пуско-наладке и эксплуатации), необходимой в процессе монтажа, пуско-наладки и последующей эксплуатации. Опыт проектирования скин-систем обобщен в альбоме типовых решений, созданном в «ССТ» [6]. Данный альбом повышает эффективность взаимодействия всех участников процессов проектирования и монтажа скин-систем обогрева трубопроводов.



Рис. 15. Шкаф управления, установленный в КТП

## Литература:

1. Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Гладких С.Н. Теплопроводные пасты silarm. / Труды II Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Якутск, 16-20.08. 2004
2. Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б., Метод определения электрофизических свойств стальных труб / Электротехника, № 8, 2009, С.55-60.
3. Струпинский М.Л., Есехин В.М. Устройство питания для двухфазных индукционно-резистивных нагрузок, обеспечивающее симметрию первичной трехфазной цепи. Патент RU 2290740. Заявлен 02.12.2005, опубликован 27.12.2006.
4. Струпинский М.Л., Есехин В.М. Устройство питания для однофазных индукционно-резистивных нагрузок, обеспечивающее симметрию первичной трехфазной цепи. Патент RU 2290739. Заявлен 02.12.2005, опубликован 27.12.2006.
5. Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой области. Справочная книга. – М.; Изд-во «Инфра – Инженерия», 2015. – 272 с.
6. ООО Специальные системы и технологии. Альбом типовых решений применения продукции. «Промышленный электрообогрев». 69 листов. 6/г