

# Научные исследования, разработка, организация производства и внедрение системы индукционнорезистивного 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 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 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 расчеты, 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.

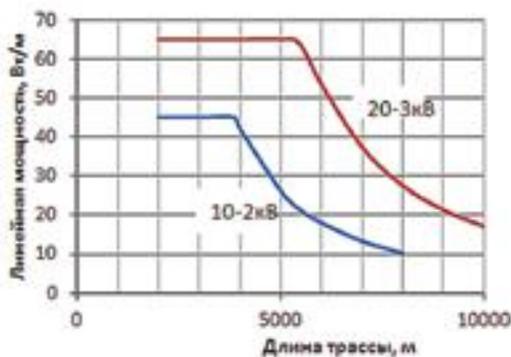
На рисунке показаны расчетные зависимости между линейной мощностью, питающим напряжением и длиной обогреваемого трубопровода. Приведены данные для случая, когда применен скин-кабель (ИРП) с полиэтиленовой сшитой изоляцией (Т максимальная рабочая 90°C) и жилами сечением 10 и 20 мм<sup>2</sup>. В качестве 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

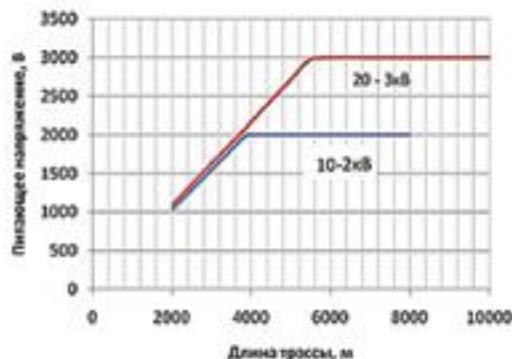
Сечение ИРН (проводника), мм <sup>2</sup> .....	15
Тип изоляции ИРН (проводника).....	ПЭ
Наличие гофрированной трубки.....	нет
Диаметр ИРН (трубы), мм.....	32
Толщина стенки трубы, мм.....	3
Длина ИРСН, м.....	13200
Поддерживаемая температура объекта, °С.....	6
Частота тока, Гц.....	50
Ток, А.....	93,04
Напряжение питания ИРСН на метр длины, В/м.....	0,295
Активная мощность в проводнике на метр длины, Вт/м.....	4,55
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.....	3500
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.....	226
Температура проводника, °С.....	14,9
Температура трубы, °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.



а)



б)

**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.

длинах) 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 равно предельно допустимому. Именно величина питающего напряжения ограничивает максимально возможную линейную мощность системы. Точка перегиба для кабеля сечением 10 мм<sup>2</sup>, с  $U_{пит макс} = 2000$  В, приходится на длину 3850 м, а для кабеля сечением 20 мм<sup>2</sup>, с  $U_{пит макс} = 3000$  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 горячекатанных и холоднотянутых стальных труб с литературными данными.

