

# 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 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.

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.

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. Существование этих методик изложено в работах [1, 2, 3, 4, 5].

Методика оформлена в виде удобной программы, позволяющей выполнить варианты расчетов, 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.

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.

Графики имеют две характерных области: в начальной части нет зависимости мощности от

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ИГСН

Свчвиза HJrt (вровоиош»), нсз ■. 4.. >.....44..1Д  
 Глл НКСИВ\* МЗ идомшым\* ■ ' ■ ' .....й  
 "inz'jzt ?й|1СФП1шн.:Л zcyе-xa.L ..... J .... 1..... L ,»ti  
 ^2\*L1E7P ][?K (Epyflv> , jZl. ....U  
 tW&W СТВНК tp/U, №.....+ .....>...9  
 zzwni wfij,, а ..... i-iisr»  
 ихмриув» с4МНН. 'С.....С  
 liKffii tot\*, Гя .....  
 Гоч» 1 ..... -  
 ■1ц154л«яч п»тіхна на х\*тр у»w<sub>d</sub> ■/\* ..... п.,^r?>s  
 АКІЗІМІК кооностк ■ ПЕОДОЕІЛК\* кІ к\*тр znjnc, ty/и ..... 4, SI  
 Дк;я1ХМ мвскстк « \*\*\* Х\*Р длімг. Вт?Х.4..... .4..1J,5  
 АСІКІSU waatek "(КЗ вІ нсер ааявм, к?/м.....17  
 ГскяТяхкІЛ найлоСтв к Сф\*«\*tMr\* па kelp Шопе й4ф/и....fr,341 Рвактхвил  
 иленость к zpySe МЛ мтр л.-лнх. пр/я ..... 7, (К  
 ФНКТХІUJС Kswteer > т\*1?р+ к\* вир ;ляш, ..... Р.зса  
 Ъактва косность Ji/iM aa >:ry ZJIZMU,- вар/х..... TrM  
 №\*Ф|м1вдхт вяхкен икн ..... P,\*43  
 Капрах«Ей\* я» аовчрпоста Cf-ZK ка кахр логики, 1/м..... &,K73 Hinpjuitzk:-  
 zarcznx E?ZH. ил теп длину скохахи, Е.....SEN  
 Актмия НМ»W!C\* ХКЯ п! 1« дліку СІС?ЪСЬ<sup>b</sup>. яВ7..... .231,1  
 І4апШк KZIZHOZTb ::PCM к-л ІСЕ zjzixy сисгаис. шр. ... , 1-7G-,! прлхм пси»;?  
 хрса ма диму пстмяе. хк-'-..... 3к,>  
 ZxxwiMjt евцдоквлкп\* ІГСН и\* дев иіку «стена, Сн ..... S6,S  
 FtkKTXIKCk tsejOIWfчHKC\* ККМ Не Вь? АЛКН/ СМClт», Си...31,3 Пли в\*  
 всцюшаламч\* ІРСН мл аса дпхнр акцэрс, Си .....tм j l  
 Іаука\*всмь ХКЯ яа в» шшу смсэвш^ Пі. ....Ф,Ф10£  
 Ндпрахетлсе як поверхності ІМІ та і'і лпы zkzz-txu.. В. . Z24 TKatptrypk  
 првзмнюл, 'С,,,,,.....ю  
 Гктаересура хруйк. "С..... -.....>\_r/I

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.

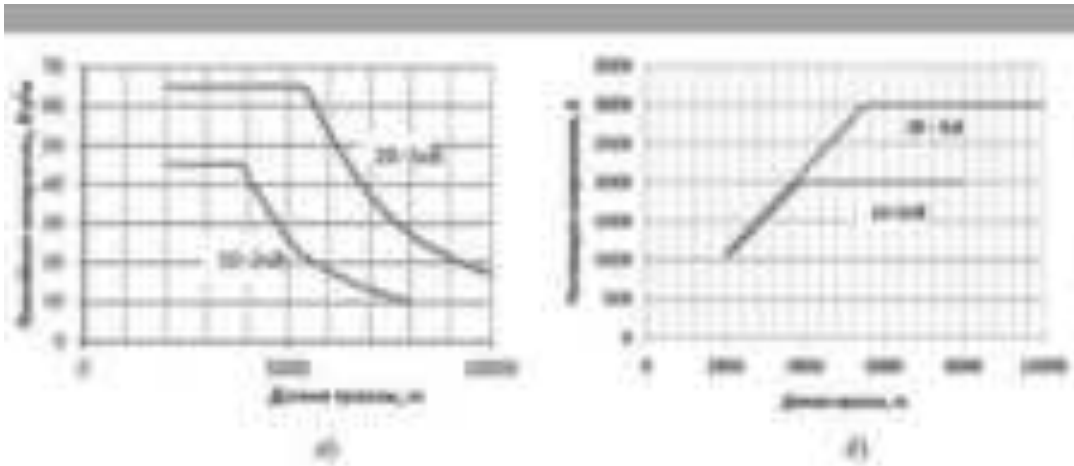


Рис. 2. Зависимость линейной мощности и питающего напряжения от длины трассы. Скин-системы обогрева, использующие ИРП кабели с ПЭ сшитой изоляцией. Т макс = 75°C.

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  $10 \text{ мм}^2$ , с  $U_{\text{нпТ макс}} = 2000 \text{ В}$ , приходится на длину 3850 м, а для кабеля сечением  $20 \text{ мм}^2$ , с  $U_{\text{нпТ макс}} = 3000 \text{ В}$ , приходится на длину 5450 м. Исследования особенностей электромагнитного поля в скин-нагревателях продолжены в работах [7,8].

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

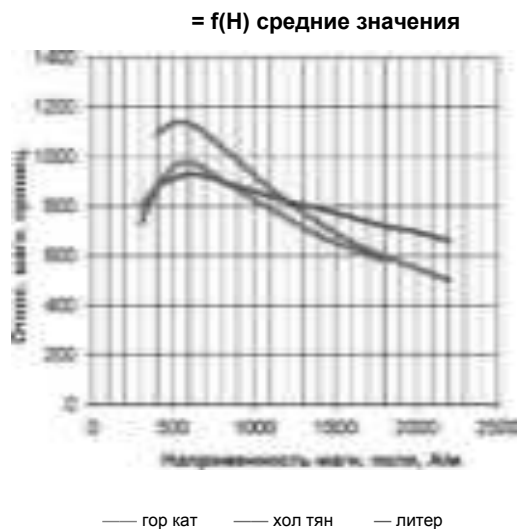
уточнить известные по литературным источникам данные по магнитной проницаемости технической стали (рис. 3). По результатам исследований рекомендовано использовать для систем ИРСН бесшовные горя- чедоформированные трубы с минимально возможным содержанием углерода [6]. В дальнейшем данная методика использовалась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

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.

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.

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 холоднокатаных 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

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Струпинский М. Л., Кувалдин А. Б. Индукционно-резистивная система обогрева трубопровода. // «Электрика», № 11, 2008. с. 21-24.
6. 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.
7. Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Кувалдин А. Б., Метод определения электрофизических свойств стальных труб / Электротехника, № 8, 2009, с. 55-60.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Хренков Н. Н., Дегтярева Е. О. Расчет режимов остывания и разогрева трубопроводов. «Промышленный электрообогрев и электроотопление» 2011. № 2, с. 20-23.