

Рязанцев А.И. РАСЧЕТ НИЗКОНАПОРНОЙ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ. В работе рассматриваются проблемы неравномерности распределения воды между точками водоразбора низконапорных систем водоснабжения, которыми являются нецентрализованные поливные или сельскохозяйственные системы водоснабжения, предложена методика расчета таких систем с учетом возможности образования на разных участках сети напорного или безнапорного режимов движения воды.

Ключевые слова: низконапорная система во напора.

Riazantsev O.I. CALCULATION OF LOW-PRESSURE WATER SUPPLY SYSTEM. The paper discusses the problems of irregularity of distribution of water between points of water pumping in low-pressure water supply networks (non-centralized irrigation or agricultural water supply systems), suggests a method for calculating such systems, taking into account the possibility of generating pressure or non-pressure water flow patterns in different parts of the water pipes network.

Key words: low pressure water supply system, movement mode, pressure loss.

DOI: 10.29295/2311-7257-2019-96-2-322-328

УДК 697.4

Болотских Н.Н., Болотских Н.С.

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
(ул. Сумская, 40, Харьков, 61002, Украина; e-mail: tgytver@gmail.com;
orcid.org/000-0002-7756-6550, orcid.org/000-0003-0756-7264)*

ИНДУКТИВНО-РЕЗИСТИВНЫЕ СИСТЕМЫ КАБЕЛЬНОГО ОБОГРЕВА ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

Приведены краткий анализ и классификация электрических нагревательных кабелей, описаны технология и технические средства наиболее современных индуктивно-резистивных систем кабельного обогрева протяженных трубопроводов различного назначения, даны рекомендации по их дальнейшему эффективному применению.

Ключевые слова: нагревательный кабель, обогрев трубопроводов, индуктивно-резистивные системы, СКИН-системы.

Введение. На мировых рынках системы обогрева с использованием электрических нагревательных кабелей появились сравнительно недавно. Но несмотря на это они уже успели приобрести широкую популярность и сферу использования.

Основными элементами таких систем являются нагревательные кабели, преобразующие электрическую энергию в тепловую. Эти кабели представляют собой не линии для передачи электрической энергии на расстояние, а нагревательные элементы. Системы, в которых используются нагревательные кабели, безусловно, отличаются друг от друга по назначению, устройству, размерам, рабочей температуре, тепловой мощности и другим

параметрам. Область их применения на практике достаточно широка. Их в холодные периоды года используют для:

- обогрева различных помещений; борьбы с обледенением крыш, лестниц, тротуаров и пандусов, поверхностей открытых спортивных сооружений, шоссе и взлетных полос [1];
- полной или частичной компенсации тепловых потерь с целью обеспечения стабильного протекания технологических процессов [2] в самых разных сферах промышленности, телекоммуникаций и производства;
- обогрева резервуаров и трубопроводов с целью предотвращения замерзания в них различных жидкостей или поддержания необходимой температуры [3-6];

- разогрева труб до заданной температуры при возобновлении технологического процесса после остановок (холодный пуск объекта) [7, 8].

Кроме того, они достаточно широко используются и в быту (специальные коврики, электрические одеяла, сидения с подогревом, устройства для обогрева бытовой техники и др. [1].

Широкому распространению нагревательных кабельных систем способствовал ряд преимуществ, которыми они обладают. Это прежде всего: экономичность (благодаря оптимальному преобразованию электрической энергии в тепловую); отсутствие в системе обогрева каких-либо дополнительных веществ (топлива, окислителей и др.); экологичность; бесшумность; малая материалоемкость и ряд других.

На практике в настоящее время применяется значительное количество различных типов и моделей нагревательных электрических кабелей и их систем. В ХНУСА на базе тщательного изучения, анализа и обобщения мирового опыта создания и применения нагревательных кабелей разработана полная их классификация, которая представлена на рис. 1.

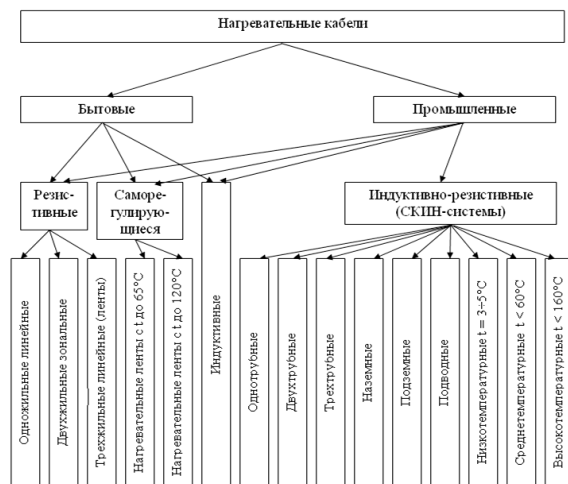


Рис. 1. Классификация электрических нагревательных кабелей

Согласно этой классификации, все нагревательные кабели по назначению делятся на две группы: бытовые и промышленные, а по принципу тепловыделения – на четыре группы: резистивные, саморегулирующиеся, индуктивные и индуктив-

но-резистивные. Практически большая часть из этих кабелей используется в системах электрообогрева трубопроводов различного назначения.

Резистивные кабели [3] отличаются простотой конструкции и общей доступностью. Их используют в системах обогрева коротких трубопроводов. Саморегулирующиеся кабели [3,5] достаточно популярны среди греющих кабелей. Они самостоятельно регулируют свою работу в зависимости от температуры окружающей среды, экономичны, надежны в работе и безопасны. Системы обогрева с использованием резистивных и саморегулирующихся кабелей оснащаются сопроводительными электрическими сетями, по которым подается ток к нагревательным секциям. При относительно малой длине трубопровода (примерно до 150 м) величина сопроводительной сети минимальна и ее цена не существенно влияет на стоимость системы обогрева в целом, а при обогреве трубопровода большей длины с помощью резистивных и саморегулирующихся кабелей цена сопроводительной сети существенно возрастает. С учетом этого обстоятельства на практике такие системы с саморегулирующимися кабелями используются для обогрева трубопроводов длиной до 3000 м.

Для обогрева трубопроводов длиной от 500 до 3000 м на практике также используются и системы с применением специальных трехжильных резистивных нагревательных кабелей серии LONGLINE (Лонглайн), подключаемых по схеме «звезды» [9,10]. Такие кабели одновременно выполняют функции нагревательных элементов и питающих линий. Эти кабели выпускаются в 3-х фазном исполнении. Они обеспечивают достаточно большие длины контура, высокую производительность и длительный срок службы системы обогрева [9]. Таким образом, с использованием промышленных систем обогрева на основе резистивных и саморегулирующихся кабелей проблема обогрева трубопроводов длиной до 3 км решается успешно и зачастую эффективно.

Организация обогрева трубопроводов большой протяженности при низких

температурах окружающей среды представляет собой, как правило, сложную и дорогостоящую проблему. Как показала практика, в таких условиях наиболее удачным решением этой проблемы является применение индуктивно-резистивных систем нагрева (ИРСН), чаще всего называемых СКИН-системами. Основными объектами, на которых применяются СКИН-системы обогрева, являются водоводы (при освоении и эксплуатации различных месторождений полезных ископаемых); транспортные линии сырой нефти и нефтепродуктов; серопроводы (транспорт жидкой серы); транспортирующие трубопроводы вязких химических веществ (межцеховые внутривозовские трубопроводы предприятий химии и нефтехимии).

Настоящая статья посвящается анализу и обобщению опыта создания и промышленного освоения новых наиболее эффективных кабельных индуктивно-резистивных систем обогрева трубопроводов большой протяженности.

Целью настоящего исследования является анализ наиболее совершенных индуктивно-резистивных систем кабельного обогрева трубопроводов большой протяженности и разработка рекомендаций по их эффективному использованию в Украине.

Основное содержание. Работа индуктивно-резистивного электрического нагревателя трубопроводов основана на использовании СКИН-эффекта (поверхностного эффекта) и эффекта близости в проводниках из ферромагнитных материалов. На рис. 2 приведена принципиальная схема обогрева трубопровода с помощью такого нагревателя [10].

Нагревающим устройством у такого обогревателя является ферромагнитный трубопровод, называемый «нагревательной трубкой», с наружным диаметром 20÷60 мм и толщиной стенки не менее 3,0 мм. Внутри этой трубки протянут высоковольтный (до 5 кВ) изолированный медный или алюминиевый проводник достаточно большого сечения (10÷50 мм²). На одном конце нагревательная трубка и проводник соединены между собой

накоротко, а на другом – к ним подключен источник переменного электрического тока высокого напряжения с промышленной частотой 50 Гц.

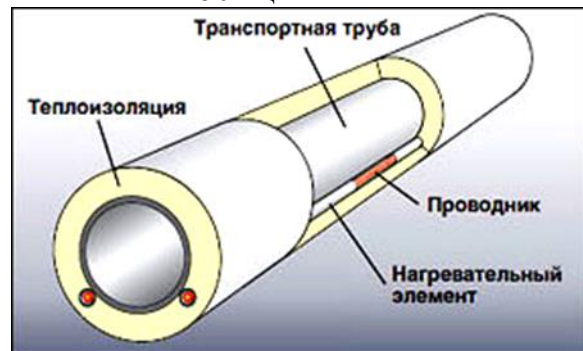


Рис. 2. Принципиальная схема обогрева трубопровода с использованием индуктивно-резистивного электрического нагревателя.

При включении электрического питания ток проходит по проводнику и обратно возвращается назад по нагревательной трубке. Таким образом, в обогревателе токи проводника и трубки направлены встречно. Взаимодействие электромагнитных полей внутреннего проводника и внешнего (нагревательной трубки) порождает поверхностный эффект и эффект близости. Концентрация обратного тока на внутренней поверхности трубки происходит благодаря магнитному потокоцеплению, создаваемому токами в проводнике и нагревательной трубке. Этот ток проникает в стенку трубки на глубину, которую называют «толщиной СКИН-слоя». В результате описанного явления (СКИН-эффекта) ток в трубке протекает по внутреннему слою (вблизи внутренней поверхности трубки), а на внешней ее поверхности напряжение фактически отсутствует, что позволяет ее заземлять. В проводнике, выполненном из немагнитного материала, заметного поверхностного эффекта не возникает, а переменный ток течет по всему его сечению.

При протекании тока происходит выделение тепла в трубке и проводнике. Основным тепловыделяющим элементом является трубка, на нее приходится 60÷80% мощности системы и только 20÷40% – на проводник [11]. Выделяемое тепло постепенно рассеивается на присоединенном обогреваемом трубопроводе, увеличивая температуру его поверхности

и содержимого в ней продукта до необходимого уровня (рис. 3) [12].

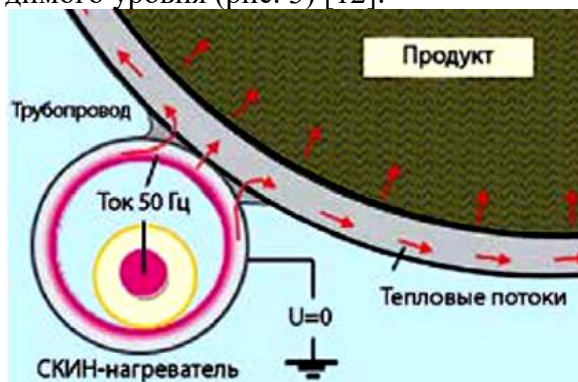


Рис. 3. Принципиальная схема теплоотдачи от СКИН-нагревателя к обогреваемому трубопроводу.

Нагревательная трубка СКИН-нагревателя непосредственно приваривается к трубопроводу либо прикрепляется к нему специальными крепежными элементами. При этом для улучшения их контакта используется теплопроводящая паста. В зависимости от требуемой мощности обогрева и протяженности транспортирующей трубы на ней могут быть установлены одна, две или три нагревательных трубки.

Малое сопротивление СКИН-системы на метр длины обогреваемого трубопровода наряду с высоким напряжением питания позволяет питать от одного источника плечи обогрева достаточно большой длины. Установлено [10], что СКИН-системы в настоящее время являются единственными системами, позволяющими обогревать плечо трубопровода длиной до 30 км с подачей питания с одного конца (без сопроводительной сети), и самыми эффективными и экономичными при обогреве магистральных трубопроводов неограниченной длины (с сопроводительной питающей сетью).

СКИН-системы для обогрева трубопроводов большой протяженности обычно включают в себя:

- а) элементы системы обогрева;
- б) системы их контроля и управления;
- в) системы электропитания.

В зависимости от схемы прокладки трубопроводов конструктивное исполнение СКИН-систем может быть трех типов: наземное, подземное и подводное. В

рамках одной системы возможна комбинация нескольких исполнений (например, наземное и подводное). При этом каждое из исполнений требует применения своих конструктивных решений и материалов.

СКИН-системы обогрева трубопроводов большой протяженности выпускаются рядом мировых компаний и фирм. Например, компанией TNEKMON (США) освоен выпуск СКИН-систем марки Therm Trac [13] для обогрева магистральных трубопроводов. В этих системах обогрева используются специально изготовленные под проект медные проводники с различной изоляцией. Наилучшие температурные характеристики, гибкость и прочность обеспечивают никелированные медные проводники с полиолефиновой изоляцией. Система марки Therm Trac с одним электрическим вводом позволяет обогревать трубопроводы длиной до 25 км. Эти системы имеют следующую техническую характеристику: удельная мощность – до 165 Вт/м; рабочее напряжение системы питания – до 5 кВ; максимальная температура поддержания – 200°C; максимальная температура непрерывного воздействия при: фторполимерной изоляции – 260°C; полиолефиновой изоляции – 125°C. Минимальная температура установки – 46°C; номинальные размеры трубок – от ½" до 1 ½" ; температурный класс – от Т6 до Т2.

Системы обогрева марки Therm Trac идеально подходят для поддержания температуры, защиты от замерзания и нагрева магистральных трубопроводов. Они представляют собой альтернативу традиционным резистивным системам обогрева протяженных трубопроводов [9, 10].

Компания «Специальные системы и технологии» (ССТ)» (Россия) [10, 11, 12] создала индуктивно-резистивную систему марки ИРСН-15000, предназначенную для разогрева, поддержания температуры и защиты от замерзания длинных трубопроводов. Нагревательный элемент этой системы представляет собой трубку, изготовленную из специальной низкоуглеродистой стали с наружным диаметром в пределах от 20 до 60 мм. Внутри нагревательной трубки расположен медный или

алюминиевый проводник сечением от 8 до 40 мм².

При обогреве трубопроводов длиной до 30 км с помощью таких систем без сопроводительной сети рабочий диапазон температур составляет от -50°C до +160°C. При напряжении питания до 4,0 кВ и частоте 50 Гц удельное тепловыделение одного элемента составляет до 100 Вт/м. При обогреве трубопроводов большой протяженности (более 30 км) системы ИРСН-15000 оснащаются сопроводительными питающими сетями. Их рабочий диапазон температур может находиться в пределах от -50°C до 200°C, а удельное тепловыделение (мощность обогрева) – до 120 Вт/м [10].

Фактическое значение удельного тепловыделения одного элемента зависит от величины сечения токонесущего проводника, диаметра нагревательной трубки и максимальной длины обогреваемого участка. Эта зависимость показана на графиках, приведенных на рис. 4.



Рис. 4. Графики зависимости удельного тепловыделения одного элемента различных по размерам нагревателей от длины обогреваемого участка трубопровода.

В зависимости от рабочей и максимально возможной температуры трубопровода системы ИРСН-15000 выпускаются в трех исполнениях [11]:

1) низкотемпературный вариант – обеспечивает защиту от замерзания водоводов, поддерживая при этом температуру от 3 до 5°C;

2) среднетемпературный вариант – обеспечивает поддержание температуры до 60°C и предназначен для обогрева трубопроводов, по которым транспортируется сырая нефть и нефтепродукты;

3) высокотемпературный вариант – до 160°C и предназначен для обогрева трубопроводов, по которым транспортируются вязкие нефтепродукты, сера, химические вещества.

Компания «ССТ» провела исследования экономической эффективности применения СКИН-системы в сравнении с другими системами кабельных нагревателей (рис. 5).

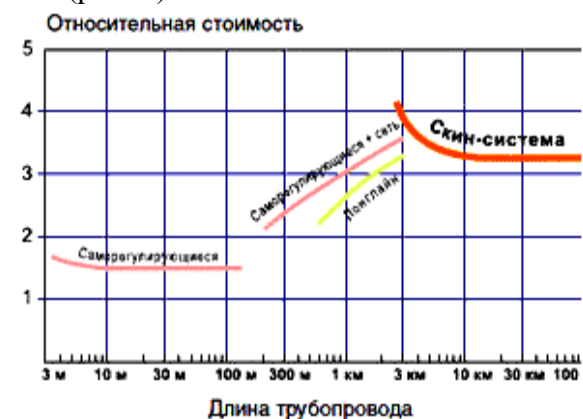


Рис. 5. Графики изменения относительной стоимости обогрева трубопроводов от их длины при использовании различных систем нагревательных кабелей

С использованием результатов этих исследований облегчается задача выбора наиболее эффективных систем электрообогрева трубопроводов различной протяженности.

Высокое качество СКИН-систем марки ИРСН-15000, выпускаемых компанией «ССТ», и сервисных услуг подтверждены соответствующими сертификатами. Они отвечают всем международным требованиям по взрыво-, электро- и пожаробезопасности. Они, в частности, сертифицированы для использования в Украине, Казахстане, республике Беларусь и др.

Для обогрева магистральных трубопроводов, транспортирующих нефть и другие жидкие продукты на большие расстояния, компания HEAT TRACE (Великобритания) [9] с использованием СКИН-эффекта разработала систему марки

SKIN-TRACE. Эта система электрообогрева имеет максимально протяженные контуры, генерирующие существенно более высокие мощности, что позволяет их использовать для обогрева сверхдлинных трубопроводов.

Система обогрева марки SKIN-TRACE включает в себя следующие компоненты: нагревательная трубка с комплектующими; изолированный проводник; источник электропитания и щит управления. Нагревательная трубка изготавливается из углеродистой стали. Она комплектуется муфтами, а также соединительными, вводными и концевыми коробками.

Изолированный проводник выполняется из никелированной или луженой меди и снабжен высокотемпературной изоляцией. Компания heat trace производит проводники SKIN-TRACE в силиконовой или фторополимерной изоляции, обеспечивающей стойкость к высоким температурам, механическую прочность, стойкость к коррозии и износу в процессе протягивания проводника в нагревательную трубку.

Источник электропитания обычно состоит из высоковольтной ячейки и силового трансформатора, а щит управления включает в себя электронный контроллер, приборы контроля и измерения и систему сигнализации.

При работе системы обогрева ток, протекающий по нагревательной трубке и проводнику, генерирует тепло. Благодаря теплообмену генерируемая мощность передается обогреваемому трубопроводу. Линейная мощность систем обогрева марки SKIN-TRACE находится в пределах от 15 до 100 Вт/м. Эти системы используются для обогрева как наземных, так и подземных трубопроводов с теплоизоляцией, устанавливаемой по месту или предизолированных.

Накопленный компанией HEAT TRACE [9] опыт убедительно подтвердил то, что система SKIN-TRACE в настоящее время является самым экономически выгодным решением задачи электрообогрева магистральных сверхдлинных трубопроводов как по капитальным, так и по

эксплуатационным затратам, обеспечивая при этом высокую надежность и длительный срок службы.

Упомянутые выше компании, выпускающие достаточно эффективные системы обогрева трубопроводов большой протяженности, накопили большой опыт их производства, проектирования, монтажных и пусконаладочных работ. Они обеспечивают полный комплекс услуг и выполнение работ «под ключ».

Выводы. 1. Для обогрева трубопроводов большой протяженности создан ряд кабельных электрических нагревателей и их систем. Наиболее экономичными и эффективными из них в настоящее время являются индуктивно-резистивные системы (ИРСН), принцип работы которых основан на применении специальных нагревательных элементов, использующих явление СКИН-эффекта и эффекта близости в проводниках из ферромагнитных материалов при подключении к ним переменного тока с высоким напряжением и промышленной чистотой.

2. Нагревательные системы марки Therm Trac [13], выполненные на основе СКИН-эффекта, обеспечивают эффективный обогрев магистральных трубопроводов длиной до 25 километров. Они представляют собой реальную рентабельную альтернативу традиционным резистивным системам электрообогрева длинных трубопроводов. С их применением в практике обогрева трубопроводов исключается использование громоздких систем распределения электрической энергии.

3. Нагревательные СКИН-системы марки ИРСН-15000 позволяют эффективно обогревать трубопроводы длиной до 30 км с подачей электрического питания с одного конца (без сопроводительной сети) и неограниченной длины – с использованием сопроводительных питающих сетей.

4. Применение нагревательных систем марки SKIN TRACE в настоящее время является одним из самых экономически выгодных решений задачи электрообогрева сверхдлинных наземных, подземных и подводных трубопроводов как по капитальным, так и по эксплуата-

ционным затратам. Они также обеспечивают высокую надежность и длительный срок службы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Индуктивные нагревательные кабели: веб-сайт. URL: <http://vse-elektrichestvo.ru/novosti/nagre-vatanye-kabeli.htm>.
2. Индуктивно-резистивные системы обогрева трубопроводов неограниченной длины: веб-сайт. URL: <http://sst-em.ru/produkcija/promychlennyy-elektrioobogrev/indukcionnorezi-stivnaya-sistema-obo>.
3. Болотских Н.Н., Болотских Н.С. Кабельные системы для поддержания температуры и предотвращения замерзания жидких сред в трубопроводах. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Т. 93. № 3. С. 218- 225.
4. Кабельный обогрев промышленных трубопроводов: веб-сайт. URL: <http://stopled.com.ua>.
5. Болотских Н.Н., Болотских Н.С. Обогрев трубопроводов с помощью гибких электрических нагревательных лент. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Т. 94. № 4. С. 199-205.
6. Нагревательный кабель – особенности и применение: веб-сайт. URL: <http://stopled.com.ua>.
7. Обогрев магистралей: веб-сайт. URL: <http://stopled.com.ua/ru/items/26-obogrev-magistralej>.
8. Кабельные системы обогрева труб: веб-сайт. URL: <http://stopled.com.ua>.
9. Магистральные трубопроводы. Промышленный обогрев. *Великобритания: Heat trace*. веб-сайт. URL: <http://w.w.w.Heattrace.com/applications/industrial>.
10. СКИН-система. Система электрического обогрева ИРСН-15000. веб-сайт. URL: <http://www.sst.ru>.
11. Промышленный обогрев протяженных трубопроводов с помощью СКИН-систем. веб-сайт. URL: <http://neftegas.ru>

analysis/view/7511-promychlennyi-obogrev-protyazhennyh-truboprovodov-s-po.

12. Струпинский М.Л., Хренов Н.Н., Кувалдин А.Б. Научные исследования, разработка, организация производства и внедрение системы индукционно-резистивного обогрева длинных и сверхдлинных трубопроводов: веб-сайт. URL: <http://meguarэк.р.ф./wp-content/uploads/2015/10/sst.skin.history-1>.
13. Нагревательные системы на основе СКИН-эффекта Therm. *США: Thermon*. веб-сайт. URL: <http://ru.thermon.com/img/thermon/tepoo41R.pdf>.
14. Нагревательная система на основе СКИН-эффекта: веб-сайт. URL: <http://w.w.w.teplina.ru/thermon/skin-effect/>.

Болотських М.М., Болотських М.С. ІНДУКТИВНО-РЕЗИСТІВНІ СИСТЕМИ КАБЕЛЬНОГО ОБІГРІВУ ТРУБОПРОВОДІВ ВЕЛИКОЇ ПРОТЯЖНОСТІ. Наведено короткий аналіз і класифікація електричних нагрівальних кабелів, описані технологія і технічні засоби найбільш сучасних індуктивно-резистивних систем кабельного обігріву протяжних трубопроводів різного призначення, дані рекомендації з їх подальшого ефективного застосування.

Ключові слова: нагрівальний кабель, обігрів трубопроводів, індуктивно-резистивні системи, СКИН-системи.

Bolotskykh N.N., Bolotskykh N.S. INDUCTIVELY-RESISTANCE OF SYSTEM OF CABLE HEATING OF PIPELINES OF LARGE EXTENT. A short analysis over and classification of electric heater cables are brought, technology and technical equipment's of the most modern inductively-resistance systems of the cable heating of extensive pipelines of the different setting are described. Recommendations are given on their further effective application.

Keywords: heater cable, heating of pipelines, inductively-resistance system, SKIN-systems.