

СРАВНЕНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ И РЕЗИСТИВНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Кувалдин А.Б.¹, Струпинский М.Л.², Хренков Н.Н.², Федин М.А.¹

¹ НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия, FedinMA@mpei.ru

² ГК «ССТ», г. Мытищи, Россия, Hrenkov@sst.ru

Аннотация — Рассмотрены проблемы расчета устройств нагрева ферромагнитной стали в слабых электромагнитных полях. Приводится сравнение вариантов применения индукционного, электроконтактного и комбинированного нагрева труб. Рассмотрены специальные задачи – варианты систем электрообогрева: применение биметаллических внешних проводников; применение повышенной частоты; влияние разреза (зазора) стальной трубы. Рассмотрены возможности реализации результатов исследований, технологические и технико-экономические трудности.

Ключевые слова — индукционный нагрев ферромагнитной стали, слабое электромагнитное поле, электрообогрев трубопроводов, индукционно-резистивная система нагрева, индукционный нагреватель, резистивный нагреватель.

ВВЕДЕНИЕ

Низкотемпературный индукционный, электроконтактный (резистивный) и комбинированный индукционно-резистивный виды нагрева изделий из ферромагнитной стали достаточно широко применяются для проведения различных технологических процессов, например, термообработка изделий, подогрев перед сваркой, нагрев пресс-форм, обогрев сосудов и др. При разработке таких нагревательных устройств возникает задача расчета параметров электромагнитного поля в ферромагнитной проводящей среде, при решении которой необходимо учитывать нелинейную зависимость относительной магнитной проницаемости материала μ от напряженности магнитного поля H [1].

Существуют технологические процессы, в которых нагрев стальных изделий используется, главным образом, для компенсации тепловых потерь: обогрев трубопроводов, резервуаров, бункеров и т.д., для чего требуются малые удельные поверхностные мощности (до 5 кВт/м^2) и, соответственно, слабые магнитные поля ($H < 4000 \text{ А/м}$). При этом на параметры электромагнитного поля начинает заметно сказываться влияние потерь энергии на гистерезис, что необходимо учитывать в расчетах характеристик устройств.

В этих случаях при расчете устройств индукционного, резистивного и комбинированного индукционно-резистивного нагрева стальных изделий на промышленной частоте, в частности труб (схемы устройств показаны на рис. 1), возникает задача учета мощности потерь на перемагничивание стали (гистерезис).

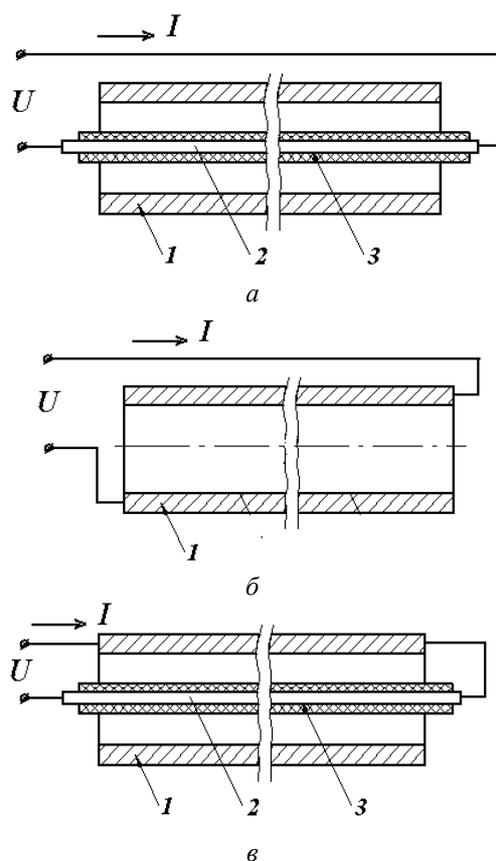


Рис. 1. Эскизы устройств индукционного (а), резистивного (б) и индукционно-резистивного (в) нагрева:

1 - ферромагнитная труба, 2 - стержневой индуктор, 3 - электроизоляция

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ФЕРРОМАГНИТНОЙ СТАЛИ

Существующие универсальные программные пакеты, например *ELCUT*, позволяют проводить моделирование электромагнитного поля в ферромагнитной стали методом конечных элементов. На рис. 2 представлена расчетная область с наложенной сеткой дискретизации и распределения плотности тока в стенке ферромагнитной трубы для устройств индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева, полученные в *ELCUT*.

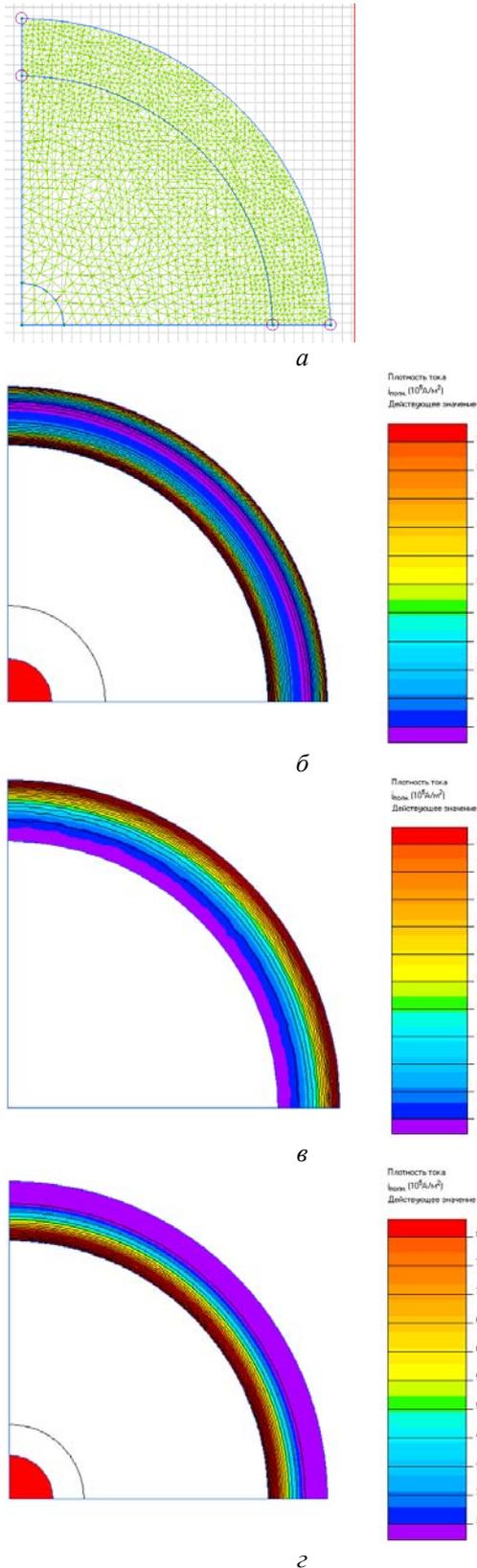


Рис. 2. Расчетная область с сеткой дискретизации (а) и распределение плотности тока в стенке ферромагнитной трубы для устройств индукционного (б), резистивного (в) и индукционно-резистивного (г) нагрева

Моделирование производилось при следующих исходных данных: сечение медного центрального

проводника – 15 мм², внешний проводник – труба 32x3 (сталь 10), ток $I = 100$ А, частота тока $f = 50$ Гц.

В качестве граничного условия на внешней поверхности трубы задавалось значение напряженности магнитного поля: $H = 994,7$ А/м (для индукционной и резистивной системы нагрева), $H = 0$ (для индукционно-резистивной системы нагрева), на осях симметрии для всех случаев – нулевая тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля $H_t = 0$. Поскольку в пакете *ELCUT* перемагничивание стали не учитывается, его можно использовать лишь для предварительных оценочных расчетов.

Поэтому была разработана методика расчета устройств индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева с учетом перемагничивания, основанная на использовании электрических схем замещения [2 – 5]. При расчете принимается ряд допущений, в том числе:

1. Стенка трубы считается плоской, так как глубина проникновения электромагнитной волны в материал трубы много меньше радиуса нагреваемой трубы.
2. Магнитная индукция B и напряженность магнитного поля H изменяются во времени по синусоидальному закону.
3. Относительная магнитная проницаемость μ по толщине стенки трубы постоянна во времени и равна значению, соответствующему действующему значению напряженности магнитного поля в данной точке.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ФЕРРОМАГНИТНОЙ СТАЛИ

С использованием разработанных методик рассчитаны параметры электромагнитного поля в ферромагнитной стали с учетом гистерезиса. Установлено также, что изменения параметров электромагнитного поля в стенке трубы для устройств индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева различно, что отражается на распределении напряженности магнитного поля, токов и выделяющейся мощности по слоям. На рис. 3 представлены распределения напряженности магнитного поля в стенке трубы для устройств индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева при исходных данных, описанных выше.

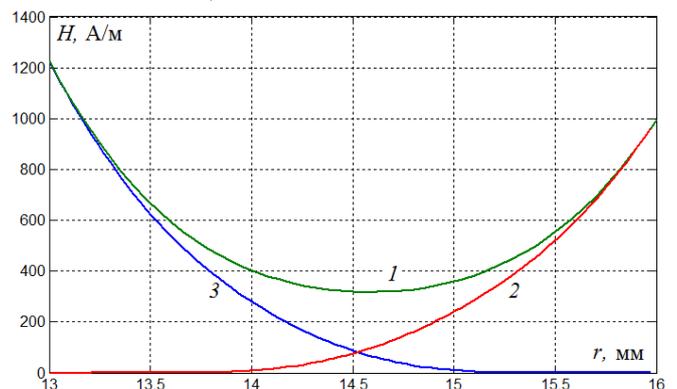


Рис. 3. Характеры распределения напряженности магнитного поля в стенке трубы для устройств индукционного (1), резистивного (2) и индукционно-резистивного (3) нагрева

Отметим, что для рассматриваемых случаев распределение значений относительной магнитной проницаемости μ в точках стенки трубы будет различным соответственно зависимости μ от напряженности магнитного поля H . При этом результаты расчета выделяющейся мощности на 1 м длины в стержневом индукторе P_1 и в ферромагнитной трубе P_2 хорошо совпадают с результатами экспериментов (табл. 1).

Табл. 1. Сравнение результатов расчета (разработанная программа) и эксперимента

| | Индукционный нагрев | Резистивный нагрев | Индукционно-резистивный нагрев |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|
| Расчет по разработанной программе | | | |
| P_1 , Вт/м | 13.3 | - | 13.3 |
| P_2 , Вт/м | 53.2 | 26.0 | 28.4 |
| Экспериментальные результаты | | | |
| P_1 , Вт/м | 13.3 | - | 13.3 |
| P_2 , Вт/м | 53.6 | 25.6 | 28.6 |

Проведенные с использованием созданных методик расчеты позволили определить влияние вклада потерь на гистерезис в суммарную активную мощность P в ферромагнитной трубе (на 1 м длины). Для систем индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева трубы из конструкционной стали этот вклад составляет при значениях напряженности магнитного поля на поверхности H_0 до 2500 А/м более 24% и при H_0 до 3800 А/м – более 15% (рис. 4). Для устройств индукционного и индукционно-резистивного нагрева значение H_0 соответствует внутренней поверхности ферромагнитной трубы, для устройства резистивного нагрева – внешней поверхности трубы.

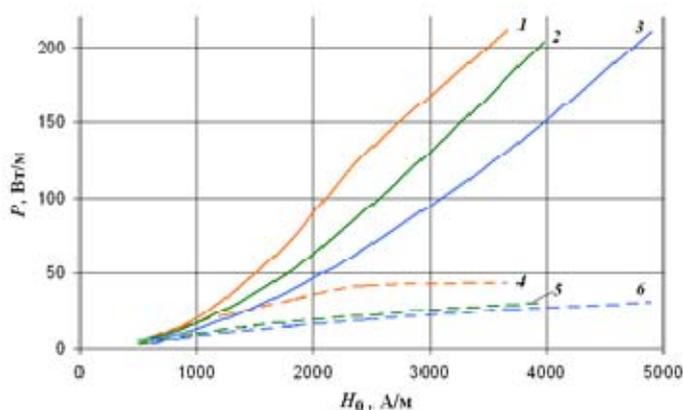


Рис. 4. Активная мощность в трубе за счет индуцированных токов и гистерезиса для устройств индукционного (кривые 1, 4), резистивного (кривые 2, 5) и индукционно-резистивного (кривые 3, 6) нагрева в зависимости от напряженности магнитного поля

ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНЫЕ СИСТЕМЫ НАГРЕВА С БИМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВНЕШНИМ ПРОВОДНИКОМ

Наибольшее применение для обогрева трубопроводов находят индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН). Длина ИРСН, которая, как правило, не превышает 15 км, определяется соотношением питающего напряжения U (обычно не более 5 кВ) и линейного падения напряжения на нагревателе, равного $0,3 \div 0,5$ В/м. Величина питающего напряжения ограничена, главным образом, возникновением частичных разрядов внутри изолирующих элементов при высоких напряжениях питания.

Одним из путей увеличения длины системы является уменьшение линейного падения напряжения, достигаемое за счет внутреннего шунтирования внешнего проводника (трубы). Добиться снижения линейного падения напряжения при той же мощности тепловыделения возможно с использованием внутренних шунтов различной конфигурации. Возможны следующие способы организации шунтирования: в виде биметаллического внешнего проводника, пластины или кабеля, проложенных внутри ферромагнитной трубы. Как показано ниже все три способа являются эквивалентными, поскольку из закона полного тока следует, что напряженность магнитного поля на внутренней поверхности ферромагнитной трубы будет одинаковой для всех случаев.

Проверка эквивалентности способов организации внутреннего шунтирования была осуществлена с помощью программы *ELCUT*. На рис. 5 представлены распределения плотности тока в ИРСН для систем с шунтом в виде: равномерного слоя по длине окружности трубы (а), пластины (б) и кабеля (в). Как видно из рис. 5, картины поля в ферромагнитной трубе в этих случаях получаются одинаковыми. Практически равными для всех трех вариантов оказываются и значения интегральных электрических и энергетических характеристик (мощность тепловыделения в элементах системы, напряжение питания, напряжение на поверхности трубы и др.). Следует отметить, что эквивалентность способов организации внутреннего шунтирования была подтверждена и экспериментально.

С использованием разработанной методики в среде *MATLAB* произведены расчеты двухслойной и однослойной ИРСН. На рис. 6 представлены рассчитанные распределения напряженности магнитного поля H в стенке трубы. Расчет производился при следующих исходных данных: нагрев на промышленной частоте $f = 50$ Гц, материал горячекатаной трубы 32х3 – сталь 10, сечение медного индуктора – 50 мм^2 , ток индуктора – 150 А. Для двухслойной системы сечение медного слоя S_m составляло 5, 9, 16 и 25 мм^2 , что соответствует толщине медного слоя 0,06, 0,11, 0,20 и 0,31 мм соответственно. На рис. 6 область резкого снижения H соответствует медному слою, область для r от 13 до 16 мм – ферромагнитному слою. Установлено, что при использовании медного слоя H на внутренней поверхности ферромагнитного слоя существенно снижается. Это приводит к снижению мощности тепловыделения в ферромагнитном слое. Так, при токе индуктора 150 А, для однослойной ИРСН мощность тепловыделения в ферромагнитной трубе составляет 54,8 Вт/м, а для двухслойной ИРСН ($S_m = 16 \text{ мм}^2$) 21,0 Вт/м [6].

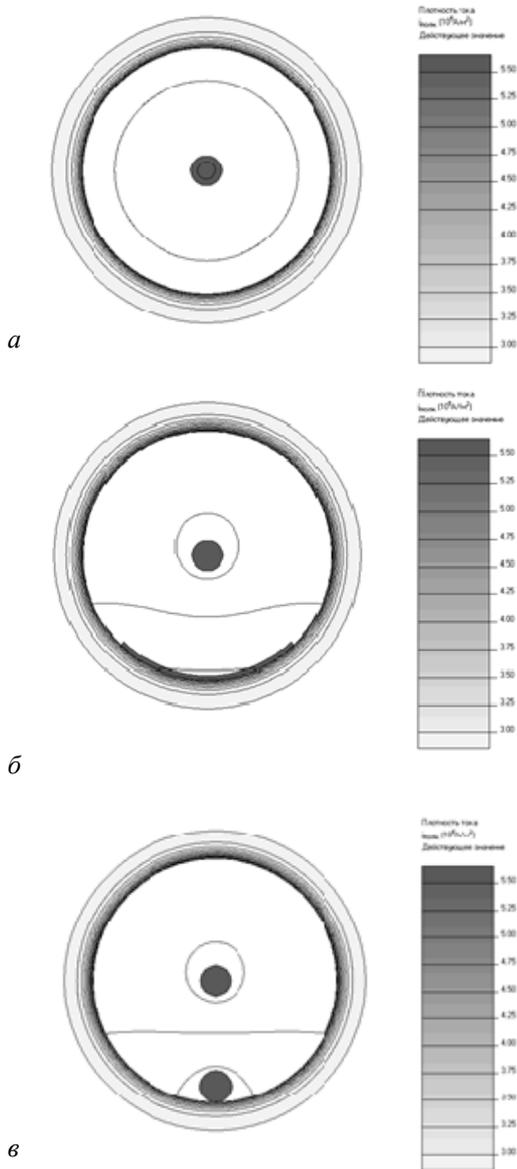


Рис. 5. Распределение плотности тока в ИРСН, полученное в ELCUT для системы с шунтом в виде равномерного слоя по длине окружности трубы (а), пластины (б) и кабеля (в)

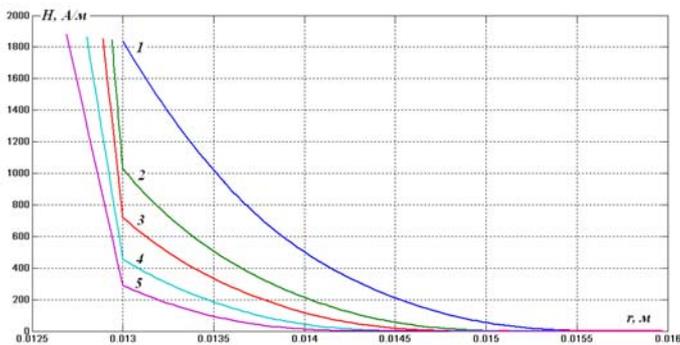
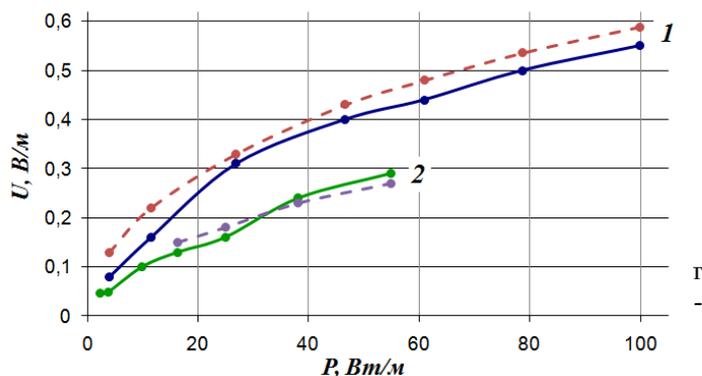


Рис. 6. Распределение напряженности магнитного поля в стенке трубы для ИРСН без шунтирования (1) и с шунтированием внешнего проводника: $S_M=5 \text{ мм}^2$ (2); $S_M=9 \text{ мм}^2$ (3); $S_M=16 \text{ мм}^2$ (4); $S_M=25 \text{ мм}^2$ (5)

Напряжение на поверхности трубы снижается при шунтировании и для двухслойной ИРСН уже при $S_M=5 \text{ мм}^2$ представляет исчезающе малую величину.

В результате эксперимента были получены зависимости линейного падения напряжения U от суммарной мощности системы P , представленные на рис. 7 для системы с медным слоем сечением 16 мм^2 и без медного слоя. Отличие результатов эксперимента и расчета в широком диапазоне изменения мощности в трубе не превышает 10%.

Из полученных расчетных и экспериментальных результатов видно, что при использовании медного шунта значительно снижается линейное падение напряжения питания, необходимое для выделения в системе нагрева одинаковой мощности. При этом для ИРСН с медным слоем при $S_M=16 \text{ мм}^2$ ток индуктора возрастает на 50 – 70 % по сравнению с ИРСН без медного слоя.



Причём с увеличением сечения внутреннего шунта линейное напряжение питания при одной и той же суммарной мощности тепловыделения уменьшается (табл. 2).

Табл. 2. Электрические характеристики ИРСН

| P, Вт/м | 10 | 33 | 64 | 102 | 146 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Без медного слоя | | | | | |
| I, А | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 |
| U_1 , В/м | 0,2 | 0,366 | 0,491 | 0,593 | 0,669 |
| $S_M=16 \text{ мм}^2$ | | | | | |
| I, А | 85 | 150 | 225 | - | - |
| U_1 , В/м | 0,116 | 0,201 | 0,3 | - | - |
| $S_M=25 \text{ мм}^2$ | | | | | |
| I, А | 100 | 175 | 250 | - | - |
| U_1 , В/м | 0,117 | 0,187 | 0,266 | - | - |

Установлено, что при использовании ИРСН с внутренним медным слоем сечением 16 мм^2 напряжение питания на метр длины системы снижается на 30 – 40% по сравнению с системой без медного слоя в диапазоне мощностей от 20 до 60 Вт/м.

Следует также отметить, что наличие внутреннего медного слоя трубы приводит к увеличению коэффициента мощности ИРСН и снижению условного электрического КПД (отношение мощности в шунте и трубе к суммарной мощности тепловыделения в системе).

ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНАЯ СИСТЕМА НАГРЕВА
ПРИ ПИТАНИИ ТОКОМ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ

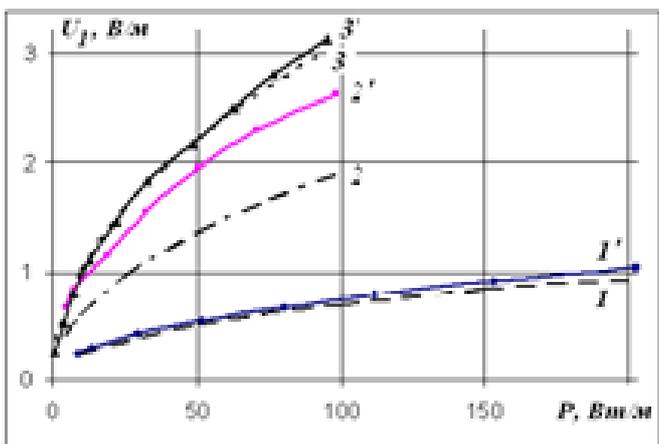
Питание ИРСН, как правило, осуществляется от источника напряжения промышленной частоты.

Для увеличения гибкости нагревательной трубы с целью облегчения монтажных работ можно использовать ферромагнитную трубу с толщиной стенки менее 1 мм при питании системы нагрева током средней частоты.

Расчет ИРСН на средней частоте производился с использованием методики, применяемой для расчета ИРСН на промышленной частоте и реализованной в программе *IRSN*. Программа *IRSN* позволяет рассчитывать электрические и энергетические характеристики системы нагрева с учетом перемагничивания ферромагнитной трубы.

Расчитанные зависимости напряжения питания U_1 от суммарной активной мощности системы P на метр длины представлены на рис. 8 для частот 50, 2380 и 8800 Гц (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

Были проведены экспериментальные исследования ИРСН при питании от источника промышленной и средней частоты (2380 и 8800 Гц) с использованием в качестве нагревателя трубы 38x3 (сталь 20) и в качестве индуктора медного кабеля с сечением жилы 10 мм². На рис. 8 также представлены зависимости U_1 от P , полученные экспериментально (кривые 1', 2' и 3' для частот 50, 2380 и 8800 Гц соответственно). Установлено, что с увеличением частоты для поддержания неизменной суммарной мощности необходимо увеличивать напряжение питания, поскольку сопротивление системы возрастает. Некоторое отличие расчетных данных от экспериментальных объясняется тем, что используемая методика расчета не учитывает изменение потерь на перемагничивание с ростом частоты.



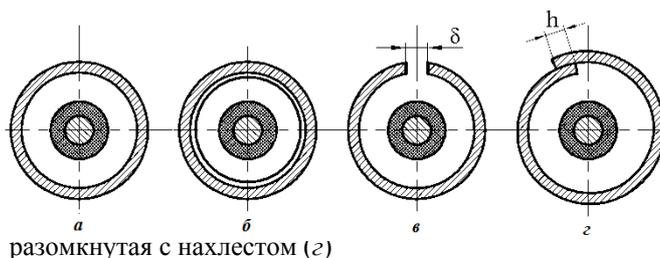
Поэтому предполагается усовершенствование расчетной методики с целью её использования при проектировании ИРСН при питании током средней частоты.

ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА И НАХЛЕСТА НА ПАРАМЕТРЫ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНОЙ СИСТЕМЫ НАГРЕВА

К индукционным и резистивным нагревателям трубопроводов предъявляются следующие требования: ограничение по значению питающего напряжения

(обычно $U < 5,0$ кВ), минимальное напряжение на единицу длины (U_1 , В/м), минимальное напряжение на наружной поверхности трубки (u_n , В/м), технологичность изготовления, малая металлоемкость и т.д.

Для достижения наилучших результатов по этим показателям авторами были предложены и исследованы различные варианты выполнения индукционных и индукционно-резистивных нагревателей, сечения которых представлены на рис. 9 а, б, в, г [7].



разомкнутая с нахлестом (г)

Исследования проводились с использованием теоретических (математическое моделирование) и экспериментальных методов. При этом применялись как разработанные авторами программы, так и профессиональные пакеты программ.

Для исследования индукционных нагревателей, ИРСН обычного типа и ИРСН с биметаллической трубкой использовались программы, которые реализовывали разработанный метод расчета электромагнитного поля при малых значениях напряженности магнитного поля ($H < 4,0$ А/м) с учетом нелинейной зависимости $\mu(H)$.

Сравнение расчетных характеристик вариантов устройств индукционного нагрева и ИРСН (рис.1 а, в) при использовании однослойной трубки (рис. 9 а) показало, что вариант ИРСН предпочтительнее, так как при этом помимо одностороннего подвода питания достигаются меньшие значения u_n (значения удельной мощности P одинаковы). Однако вариант устройства индукционного нагрева имеет определенное преимущество, связанное с технологией монтажа системы обогрева, так как трубка нагревателя может быть выполнена из отдельных, электрически не связанных участков.

Для упрощения изготовления и монтажа систем обогрева оказывается целесообразным применение в нагревателях разомкнутых трубок с зазором (рис. 9 в), однако уже предварительные исследования показали, что более предпочтительным является использование разомкнутых трубок с нахлестом (рис. 9 г).

При исследовании нагревателей с разомкнутой трубкой с зазором и с нахлестом использовался программный пакет *ELCUT*. Этот пакет не дает возможности учета потерь на гистерезис, однако очень удобен для проведения оценочных исследований при просмотре различных вариантов конструктивного исполнения. Полученные данные подтвердили возможность использования нагревателей с разомкнутой трубкой при определенных значениях нахлеста h (рис. 9 г). В этих случаях напряжения U_1 и u_n (при одинаковой

удельной мощности P) имеют примерно одинаковые значения для случаев рис. 9 а и рис. 9 з.

Проведенные эксперименты на физических моделях нагревателей, а также данные, полученные при работе изготовленных промышленных систем обогрева трубопровода, подтвердили результаты теоретических расчетов.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Как уже было сказано выше, ИРСН нашли свое применение в сфере промышленного обогрева трубопроводов. На сегодняшний день это практически единственный экономически оправданный способ обогрева трубопроводов длиной более 3 км. ИРСН обеспечивает разогрев, поддержание технологической температуры, а также защиту от замерзания трубопроводов (рис. 10).

Основными объектами, на которые устанавливаются такие системы, являются: водоводы (при освоении и эксплуатации всех видов месторождений), выкидные линии (транспортируемые продукты – сырая нефть и нефтепродукты), серопроводы (транспорт жидкой серы), трубопроводы транспорта вязких химических веществ (внутризаводские межцеховые трубопроводы предприятий химии и нефтехимии), газопроводы (ИРСН противоконденсатного действия) [8].



Рис. 10. Обогреваемый трубопровод и смонтированная на нем ИРСН

На основе исследований влияния внутреннего проводящего слоя ферромагнитной трубы ИРСН, зазора и нахлеста получены данные для решения различных конкретных задач проектирования устройств индукционного и индукционно-резистивного нагрева, которые частично реализованы фирмой «Специальные системы и технологии» в изготовленных и запущенных в эксплуатацию системах обогрева трубопроводов.

Выводы

1. Расчет устройств индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева по электрической схеме замещения позволяет учитывать потери на гистерезис. При этом отличие методики электрического расчета устройств состоит только в самой схеме замещения.

2. В рассматриваемых устройствах при нагреве с малыми значениями напряженности магнитного поля (до 4000 А/м) необходимо учитывать влияние магнитного гистерезиса на результаты расчета; в частности, доля вклада гистерезиса в суммарную активную мощность в ферромагнитной нагрузке при H_0 до 2500 А/м составляет $\geq 24\%$, при H_0 до 3800 А/м – $\geq 15\%$.

3. Наличие внутреннего медного слоя значительно снижает линейное падение напряжения при неизменной суммарной мощности тепловыделения, что позволяет удлинить систему нагрева. Для рассмотренного варианта (рис. 7) применение двухслойной ИРСН позволяет снизить напряжение питания на метр длины системы на 30 – 40% и, соответственно, увеличить длину ИРСН.

3. Разработанные методики расчета могут использоваться при проектировании устройств для нагрева ферромагнитной стали рассматриваемых типов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кувалдин А. Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. 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.
3. 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.
4. Kuvaldin A., Strupinskiy M., Khrenkov N., Fedin M. Simulation of electromagnetic field in ferromagnetic steel taking into account hysteresis effect / *International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources HES-10*. Padua, May 18-21, 2010, pp. 83-89.
5. Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А. Моделирование электромагнитного поля в ферромагнитной стали при индукционном, электроконтактном и комбинированном нагреве / *Журнал «Индукционный нагрев»*, № 13, 2010. С.17-21.
6. Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А. Индукционно-резистивная система нагрева с биметаллическим внешним проводником. *Электричество*, №2, 2011. С. 58 – 63.
7. M. Strupinskiy, N. Khrenkov, A. Kuvaldin, M. Fedin. The influence of a gap on electric parameters of induction-resistive heater. *Tagungsband. Ilmenau*, 2011.
8. Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А. Расчет и внедрение индукционно-резистивной системы обогрева трубопроводов. Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ – 2011. Сборник научных трудов. Екатеринбург, 2011. С. 55 – 60.