

УДК 621.3

## РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТОРА ИНДУКЦИОННОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НЕФТЕПРОВОДОВ

<sup>1</sup>Конесев С.Г., <sup>1</sup>Хлюпин П.А., <sup>2</sup>Садиков М.Р.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,  
Уфа, e-mail: KonesevSG@yandex.ru;

<sup>2</sup>ООО НИЦ «Энергодиагностика», Уфа

Представлена методика электрического расчета основных элементов индукционной нагревательной системы нефтепроводов на примере отдельно взятых узлов и элементов трубопровода. Рассмотрены варианты расположения индуктора навитием и вдоль оси трубопровода прямым и обратным проводником. Разработаны магнитная и электрическая схемы замещения и приведен расчет параметров индуктора для каждого из специфических элементов нефтепровода. Приведен расчет индуктивности токопроводящего проводника для каждого отдельно взятого элемента нефтепровода с учетом сложной конфигурации. Приведена формула для расчета тока потребляемого индуктором, в которой учитывается индуктивность и число витков индуктора, характеристика объекта нагрева, а также формируемое тепловое поле в нагреваемом нефтепроводе.

**Ключевые слова:** индукционная нагревательная система, фланец, задвижка, магнитное поле, вихревой ток, индуктор

## DEVELOPMENT BY ENGINEERING CALCULATION METHOD FOR PARAMETERS INDUCTOR INDUCTION HEATING PIPELINE SYSTEM

<sup>1</sup>Konesev S.G., <sup>1</sup>Khlyupin P.A., <sup>2</sup>Sadikov M.R.

<sup>1</sup>Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, e-mail: KonesevSG@yandex.ru;

<sup>2</sup>Ltd SEC «Energodiagnostics», Ufa

Presents a methodology of calculating the basic elements of an electric induction heating system of oil pipelines by the example of individual nodes and elements of the pipeline. Consideration variants of the location of the inductor are wound and along the axis of the pipeline the direct and the return conductor. Developed magnetic and electric equivalent circuit parameters and presents the calculation the inductor for each of the specific elements of the pipeline. The calculation of the inductance of the conductive wire for each individual element of the pipeline with the complex configuration. Presents a formula to calculate the current of consumed the inductor, which takes into account the number of turns and the inductance of the inductor, the heating characteristics of the object, as well as formed by the thermal field in a heated pipeline.

**Keywords:** Induction heating system, flange, catch, magnetic field, eddy current, inductor

Выбор метода расчета и анализа электромагнитных параметров индукционной системы зависит от многих факторов среди которых вид электромагнитной системы, постановка задачи исследования, имеющиеся технические средства и программное обеспечение, квалификация исследователя.

Для расчета параметров индукционной нагревательной системы (ИНС) используется метод магнитных схем замещения, который на сегодняшний день является основным методом при проектировании индукционных нагревательных систем. В основе метода лежит принцип разбиения на участки пространства, по которому проходит магнитный поток, с дальнейшим определением их магнитных сопротивлений аналитическим или любым другим способом. После чего задача решается графическим или графоаналитическим методами, которые применяются при расчете магнитных цепей электромеханических устройств.

Алгоритм определения параметров ИНС локального и попутного воздействия будет отличаться количеством участков на-

грева, на которые будет необходимо разделить систему [3].

Согласно выбранному методу разработаны магнитные и электрические схемы замещения для участков индукционной нагревательной системы. Ниже приведены схемы замещения и расчет параметров для элемента трубопровода типа «Фланец».

### Методика расчета параметров «индуктор-нагрузка» для участка «Фланец»

Вариант расположения индуктора на участке «Фланец» представлен на рис. 1, а.

Допустим, что магнитное поле однородно по всей протяженности фланца, расположенного внутри индуктора (рис. 1, б). Это позволяет найти магнитное сопротивление  $Z_{\phi} = Z_{\phi 1} + Z_{\phi 2} + Z_{\phi 3}$  и соответствующее ему сопротивление загрузки. Учитывая, что  $Z_{\phi}$  известно, магнитную схему замещения можно рассматривать как четырехполюсник с П-образной схемой замещения, в котором  $Z_{\phi}$  преобразуется во входное магнитное сопротивление индуктора (рис. 2).

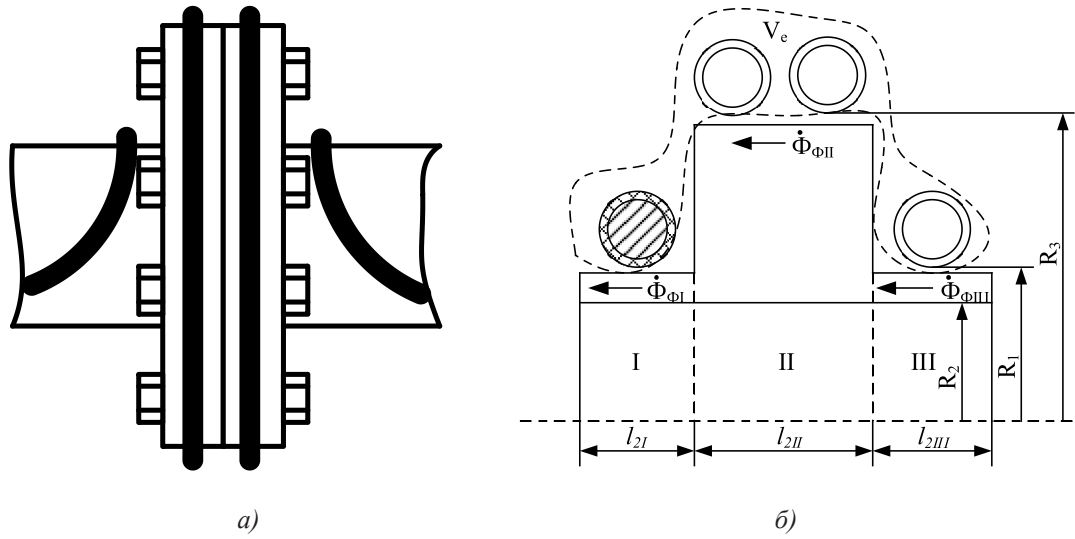


Рис. 1. Картина магнитного поля индуктора и разделение потоков в системе

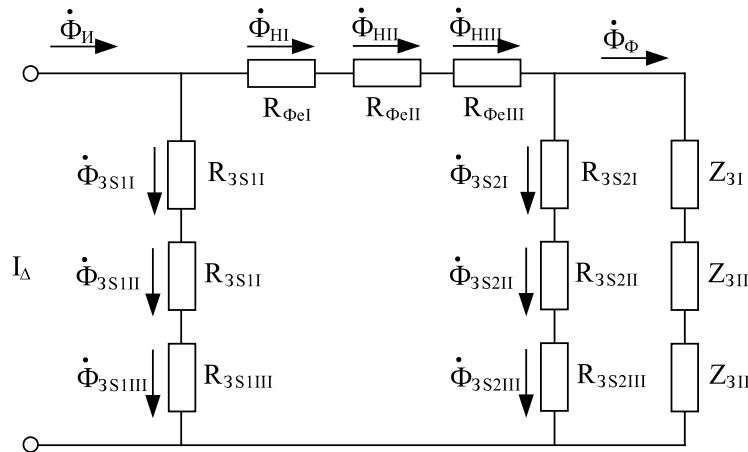


Рис. 2. Магнитная схема замещения индуктора

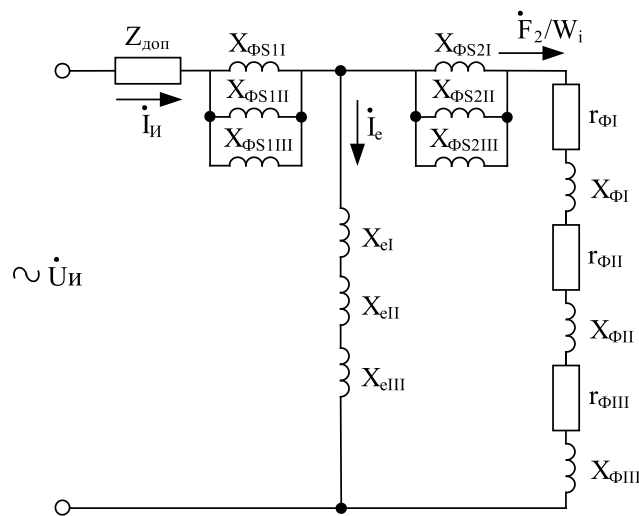


Рис. 3. Электрическая схема замещения индуктора

Согласно схеме замещения поток индуктора  $\Phi_H$ , создаваемый обмоткой, разделяется на поток  $\Phi_{\phi S1} = \Phi_{\phi S1I} + \Phi_{\phi S1II} + \Phi_{\phi S1III}$  и поток  $\Phi_u = \Phi_{\phi S2} + \Phi_{\phi}$ , проходящий по нагреваемому телу  $\Phi_{\phi} = \Phi_{\phi I} + \Phi_{\phi II} + \Phi_{\phi III}$  и по прилегающей к нему части зазора  $\Phi_{\phi S2} = \Phi_{\phi S2I} + \Phi_{\phi S2II} + \Phi_{\phi S2III}$  и затем замыкающийся через область  $V_e$  (рис. 1, б) с магнитным сопротивлением  $R_{\phi e}$ . Магнитные потоки  $\Phi_{\phi S1}$  и  $\Phi_{\phi S2}$  проходят по участкам с магнитными сопротивлениями  $R_{\phi S1} = R_{\phi S1I} + R_{\phi S1II} + R_{\phi S1III}$  и  $R_{\phi S2} = R_{\phi S2I} + R_{\phi S2II} + R_{\phi S2III}$ .

Рассматриваемому участку индуктора ИНС соответствует дуальная электрическая схема (рис. 3). Сопротивление нагреваемого участка  $Z_{\phi i} = r_{\phi i} + jx_{\phi i}$  зазор  $X_{\phi S1}$ ,  $X_{\phi S2}$  и пути обратного замыкания  $X_e$  приведены к числу витков индуктора  $W_i$  на каждом из участков и связаны с магнитными сопротивлениями этих участков соотношением

$$Z_i = \sum_{i=1}^{n=3} \frac{j\omega W_i^2}{Z_{\phi i}}. \quad (1)$$

**Дополнительное сопротивление**  $Z_{дон}$  учитывает активное сопротивление обмотки индуктора  $r_1$  и сопротивление элементов, которые могут быть включены в цепь на участке до источника питания с известным напряжением  $\dot{U}_u$  и не связано с магнитной схемой замещения. Внутреннее реактивное сопротивление индуктора  $x_{1M}$  вычисляется как часть сопротивления зазора, используя вместо реального радиуса эквивалентный  $R_{1\phi}$ , который определяется как [5]

$$R_{1\phi} = R_1 + \frac{\delta}{2} n\pi i \delta_1 \leq d_1; \\ R_{3\phi} = R_3 + \frac{\delta}{2} n\pi i \delta_1 \leq d_1, \quad (2)$$

где  $d_1$  – толщина индуктора.

При условии  $X_{\phi S2} = X_{\phi S}$  и  $X_{\phi S1} = 0$  сопротивление индуктора определяется как

$$Z_u = Z_{дон} + r_2' + jx_{\phi} = Z_{дон} + \\ + r_2 c + jc \left( x_u + \frac{x_{\phi}^2 + r_2^2}{x_e} \right), \quad (3)$$

где  $x_e = x_{\phi} + x_c$  – реактивное сопротивление зазора и загрузки;

$x_e$  – сопротивление обратного замыкания;  
 $c$  – коэффициент приведения параметров загрузки к индуктору [5]:

$$c = \frac{x_e^2}{r_2^2 + (x_e + x_{\phi})^2}. \quad (4)$$

Активное сопротивление  $r_1$  вычисляется при условии равномерного распределения тока по одной стороне токопровода обмотки [5]:

$$r_1 = \frac{2\pi\rho_1 R_{1\phi} W_{1I}^2}{l_{1I} \delta_1 g_I} + \frac{2\pi\rho_1 R_{3\phi} W_{1II}^2}{l_{1II} \delta_1 g_{II}} + \\ + \frac{2\pi\rho_1 R_{1\phi} W_{1III}^2}{l_{1III} \delta_1 g_{III}}. \quad (5)$$

где  $g$  – коэффициент заполнения обмотки медью по длине.

Сопротивление  $x_s$  вычисляется как сумма сопротивлений на каждом отрезке

$$x_s = x_{sI} + x_{sII} + x_{sIII} = \frac{\omega\mu_0\pi(R_{1\phi}^2 - R_{2\phi}^2)W_{1I}^2}{l_{1I}} + \\ + \frac{\omega\mu_0\pi(R_{3\phi}^2 - R_{2\phi}^2)W_{1II}^2}{l_{2II}} + \\ + \frac{\omega\mu_0\pi(R_{1\phi}^2 - R_{2\phi}^2)W_{1III}^2}{l_{2III}}. \quad (6)$$

Для внешних индукторов картина магнитного поля, с внесением нагреваемого объекта, изменяется незначительно, а потому параметр  $x_e$  можно определить по картине магнитного поля пустого индуктора

$$x_e = x_1 \frac{l_1}{l_1 - l_2 K_L}, \quad (7)$$

где  $K_L$  – поправочный коэффициент индуктивности [5].

При этом  $x_1$  определяется как

$$x_1 = \frac{\omega\mu_0\pi R_{1\phi}^2 W_1^2}{l_1} K_L. \quad (8)$$

Для определения  $K_L$  с погрешностью 3% преобразуется формула для цилиндрических индукторов с тонкой обмоткой [5]

$$K_{LI} = \frac{2,3}{2,3 + D_{1\phi}/l_{1I}}, K_{LII} = \frac{2,3}{2,3 + D_{3\phi}/l_{1II}}, \\ K_{LIII} = \frac{2,3}{2,3 + D_{1\phi}/l_{1III}}, \quad (9)$$

где  $D_{1\phi} = 2R_{1\phi}$ ,  $D_{3\phi} = 2R_{3\phi}$  – эквивалентные диаметры.

Зависимость  $K_L$  от  $D_{1\phi}/l_{1I}$  и  $D_{3\phi}/l_{1II}$  представлена кривой 5 на диаграмме рис. 2 [5].

Последовательность определения параметров индуктора справедлива для любого из элементов трубопровода и реализованы магнитные и электрические схемы для других участков трубопровода.

#### Расчет индуктивности контура

Для простоты решения поставленной задачи индуктивность витка будет найдется суммированием индуктивностей,

найденных для каждого участка трубопровода в отдельности. При этом рассматриваются два варианта расположения индуктора на поверхности объекта нагрева: расположение навитием и расположение витком с прямым и обратным проводником (рис. 4).

**Расчет индуктивности прямолинейного участка с прямым и обратным проводником.** Согласно [2] индуктивность прямолинейного провода при средней частоте

$$L_{\text{л}} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right), \quad (10)$$

где  $l$  – длина провода,  
 $r$  – радиус сечения провода.

Тогда взаимная индуктивность двух прямолинейных параллельных проводов располагающихся вдоль одной трубы находится как

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{h} - 1 + \frac{h}{l} \right), \quad (11)$$

где  $h$  – расстояние между проводами.

Индуктивность системы проводов вдоль прямолинейного участка

$$L = L_{\text{л}} + L_{\text{л}} - 2M = \frac{\mu_0 l}{\pi} \left( \ln \frac{h}{r} - \frac{h}{l} \right), \quad (12)$$

Индуктивность системы проводов вдоль прямолинейного участка на погонный метр [Гн/м]

$$L_0 = L_{\text{л}} + L_{\text{л}} - 2M = \frac{\mu_0}{\pi} \left( \ln \frac{h}{r} - \frac{h}{l} \right), \quad (13)$$

$$L = L_{\text{сп}} + L_{\text{л}} - 2M = w\mu_0 R \left( \ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right) + 2,4w \frac{\mu_0}{4\pi} R F_{12} + \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right) - 2 \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{R} - 1 + \frac{R}{l} \right) = w\mu_0 R \left( \ln \frac{8R}{r} - 1,75 + \frac{0,6}{\pi} F_{12} \right) + \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{R^2}{2lr} + 1 - \frac{2R}{l} \right), \quad (19)$$

Для определения значения индуктивности на погонный метр уравнение (19) примет вид [Гн/м]

$$L_B = w_0 \mu_0 R \left( \ln \frac{8R}{r} - 1,75 + \frac{0,6}{\pi} F_{12} \right) + \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{R^2}{2lr} + 1 - \frac{2R}{l} \right), \quad (20)$$

где  $w_0$  – количество витков на погонный метр.

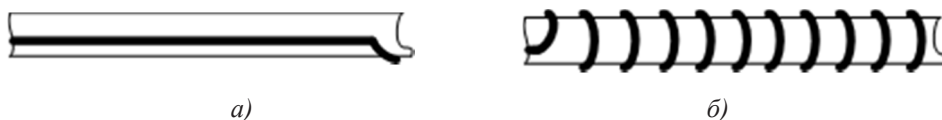


Рис. 4. Линейный участок промышленной трубы: а) индуктор расположен витком с прямым и обратным проводником, б) индуктор расположен навитием

**Расчет индуктивности прямолинейного участка с навитым индуктором (рис. 4, б).** Взаимная индуктивность коаксиальных круговых контуров определяется как

$$M_K = \frac{\mu_0}{4\pi} R F, \quad (14)$$

где  $R$  – радиус контуров (диаметр трубы),  
 $F$  – величина зависящая от  $X$  [2]

$X$  – расстояние между витками.

Индуктивность кольца

$$L_K = \mu_0 R \left( \ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right), \quad (15)$$

Следовательно, индуктивность спирали

$$L_{\text{сп}} = wL_K + 2(wM_{K12} + (w-1)M_{K13} + (w-2)M_{K14} + \dots), \quad (16)$$

где  $w$  – количество витков спирали,

$M_{K12}$  – взаимная индуктивность между 1-й и 2-й спиралью.

Учитывая резкое уменьшение  $F$  для  $2R > X$  можно сделать допущение

$$L_{\text{сп}} = wL_K + 2,4wM_{K12}, \quad (17)$$

Взаимную индуктивность между прямой линией и спиралью можно приравнять ко взаимной индуктивности двух прямолинейных проводов, проходящих через центр трубы и по окружности трубы

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{R} - 1 + \frac{R}{l} \right), \quad (18)$$

Тогда индуктивность контура спиралевидной намотки с одной стороны и длинной линии с другой

Индуктивность более сложных участков находится разбиением их на простые, и дальнейшим суммированием индуктивностей простых участков.

Результирующее значение индуктивности контура сложной геометрии находится алгебраической суммой индуктивностей элементов обогреваемого трубопровода

$$L_{\Sigma} = \sum L_{\uparrow} + \sum L_{\downarrow} + \sum L_{\oplus} + \sum L_{\ominus} \quad (21)$$

**Расчет тока, потребляемого индуктором**

Математически процесс индукционно-го нагрева можно описать законом Фарадея и законом Джоуля-Ленца [1]. В интегральной форме записываются как Закон Фарадея

$$E = 4,44 f w \Phi, \quad (22)$$

где  $E$  – электродвижущая сила;  
 $\Phi$  – магнитный поток;  
 $f$  – частота тока индуктора;  
 $w$  – число витков индуктора.

Закон Джоуля-Ленца

$$P = I_n^2 R_n, \quad (23)$$

где  $P$  – мощность тепловая;  
 $I_n$  – ток в нагреваемом объекте;  
 $R_n$  – сопротивление объекта нагрева.

Выражение (23) описывает выделившуюся тепловую мощность в нагреваемом объекте. С другой стороны, полезную тепловую мощность, выделившуюся в объеме нагреваемого трубопровода, можно записать как [5]

$$P = \frac{GcT_n}{\tau_k}, \quad (24)$$

где  $G$  – масса объекта;  
 $c$  – теплоемкость;  
 $T_n$  – температура объекта;  
 $\tau_k$  – время нагрев.

Приравняем правые части уравнений (23) и (24)

$$I_n^2 R_n = \frac{GcT_n}{\tau_k}, \quad (25)$$

Отсюда сопротивление  $R_n$  будет

$$R_n = \frac{GcT_n}{I_n^2 \tau_k}, \quad (26)$$

Ток в нагреваемом объекте  $I_n$  также можно выразить как

$$I_n = \frac{E}{R_n} = \frac{4,44 f w \Phi}{R_n}, \quad (27)$$

Подставив в выражение (27) выражение (26) получим

$$I_n = \frac{4,44 f w I_n L I_n^2 \tau_n}{GcT_n}, \quad (28)$$

Выражение (28) после преобразования примет вид

$$I_n = \frac{GcT_n}{4,44 f w I_n L \tau_n}, \quad (29)$$

Используя выражение (29) можно определить ток в нагреваемой заготовке в зависимости от физических параметров объекта и его веса.

За счет эффекта вытеснения тока, который с повышением частоты значительно проявляется, ток в индукторе следует рассчитывать с учетом глубины проникновения магнитного поля в металл нагреваемого объекта. Для наглядности на рисунке 5 приведена схема распределения температуры при индукционном среднечастотном нагреве.

Мощность необходимая для нагрева объекта записывается как

$$Q = Q_{\Delta} + Q_{\xi} + Q_{\text{пот}}, \quad (30)$$

где  $Q_{\Delta}$  – мощность, образованная вихревыми токами;  
 $Q_{\xi}$  – мощность теплопроводности;  
 $Q_{\text{пот}}$  – мощность тепловых потерь;  
 $Q_{\Delta} + Q_{\xi}$  – представляет собой полезную мощность.

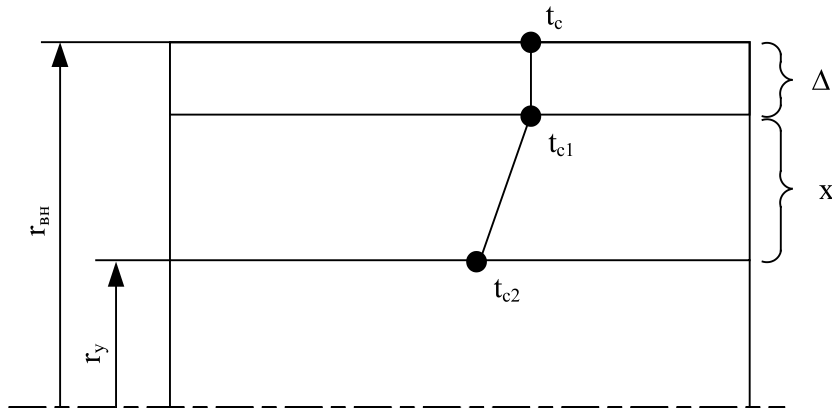


Рис. 5. Схема распределения тепла для расчета тока индуктора

Мощность  $Q_{\Delta}$  (23) можно представить через удельное сопротивление  $\rho$  и толщиной слоя  $\Delta$ , в котором протекают вихревые токи

$$Q_{\Delta} = I_n^2 \frac{\delta l}{\pi \left( (r_{\text{вн}} - \Delta)^2 - r_y^2 \right)}, \quad (31)$$

где  $r_{\text{вн}}$  – внешний радиус объекта нагрева;  
 $r_y$  – условный радиус объекта нагрева;  
 $\rho$  – удельное сопротивление  
 $l$  – длина объекта нагрева  
 $\Delta$  – глубина проникновения тока в объект нагрева.

Выражение для определения  $Q_{\xi}$  записывается как

$$Q_{\xi} = \frac{\pi \lambda_{\text{тр}} \Delta t}{X} (2r_{\text{вн}} - x) x \cdot l, \quad (32)$$

где  $\lambda_{\text{тр}}$  – коэффициент теплопередачи трубы;  
 $\Delta t$  – температурный градиент;

$$I_n = \frac{l}{4,44 \cdot w \cdot f \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{\delta_{\text{ст}} (t_{c1} - t_{c2}) \left( \rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}} \left( 2r_{\text{вн}} (\Delta + x) - (\Delta - x)^2 \right) - 2\lambda_{\text{ст}} (r_{\text{вн}} - \Delta - 2x) \right)}{2r_{\text{вн}} x - 2\Delta x - x^2}}, \quad (34)$$

где  $\delta_{\text{ст}}$  – удельное электрическое сопротивление стали;

$\rho_{\text{ст}}$  – плотность стали;

$c_{\text{ст}}$  – теплоемкость стали.

В выражении (34) известны все параметры за исключением числа витков  $w$  и индуктивности контура  $L$ , расчет которых приведен выше.

### Выводы

Разработаны электрическая и магнитная схемы замещения индуктора ИНС участков нагреваемого нефтепровода для определения параметров индуктора.

Разработаны методики расчета индуктивности токопроводящего проводника учитывающие геометрические особенности нагреваемого объекта.

Получена зависимость для определения тока в индукторе учитывающая индуктив-

$X$  – толщина участка трубы с теплопроводностью.

Мощность тепловых потерь имеет математическую форму записи

$$Q_{\text{пот}} = \frac{2\pi \lambda_{\text{ст}} \Delta t l}{\ln \frac{2r_{\text{вн}}}{2r_y}}, \quad (33)$$

Необходимую мощность теплового потока, создаваемую индукционной нагревательной системой для нагрева жидкости,

Мощность теплового потока для нагрева жидкости определяется согласно [4] и определяет мощность которую необходимо создать индукционной нагревательной системой.

Тогда с учетом уравнений (30), (31), (32), (33) и произведя преобразования получим формулу для нахождения тока, потребляемого индуктором в зависимости от частоты, индукции и геометрии объекта определяется как

ность индуктора, число витков и физические особенности объекта нагрева.

### Список литературы

1. Дианов А.И. Разработка методик расчета, конструкции и режимов работы индукционно-резистивных нагревательных устройств со стержневыми индукторами: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / А.И. Дианов. – М., 2006. – 118 с.
2. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.: ил.
3. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Разработка алгоритма инженерного расчета индукционной нагревательной системы нефтепроводов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2; URL: [www.science-education.ru/122-21282](http://www.science-education.ru/122-21282) (дата обращения: 17.08.2015).
4. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Разработка алгоритма эффективного теплового воздействия индукционной нагревательной системы для нефтепроводов при перекачке вязкой нефти // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/122-21341> (дата обращения: 18.08.2015).
5. Немков В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. – 280 с.