

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ИНДУКЦИОННОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НЕФТЕПРОВОДОВ

Конесев С.Г.<sup>1</sup>, Хлюпин П.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия (450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), e-mail: [KonesevSG@yandex.ru](mailto:KonesevSG@yandex.ru)

В статье приведены основные требования к индукционной нагревательной системе нефтепроводов, учитывающие геометрию объекта, а также режимы течения нагреваемой жидкости. Рассмотрены участки и узлы нефтепровода, имеющие геометрические особенности, определяющие требования к исполнению индуктора. Определены структуры индукционных нагревательных систем локального и попутного воздействия, обеспечивающие реализацию режимов поддержания температуры и экстренного (аварийного) разогрева. Представлена блок-схема индукционной нагревательной системы нефтепроводов и принципиальная схема индукционной нагревательной системы с индуктивно-емкостным преобразователем, обеспечивающая заряд блока конденсаторов с максимальным КПД. Предложен алгоритм инженерного расчета индукционной нагревательной системы нефтепроводов, учитывающий особенности геометрии нефтепровода и его основных узлов, гидравлические режимы течения и физико-химические характеристики перекачиваемой по нефтепроводу нефти. Алгоритм позволяет рассчитать основные энергетические и электрические характеристики индукционной нагревательной системы нефтепроводов.

Ключевые слова: индукционный нагрев, инженерная методика, нефтепровод.

## DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR ENGINEERING CALCULATIONS OF INDUCTION HEATING SYSTEM OIL PIPELINE

Konesev S.G.<sup>1</sup>, Khlyupin P.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>«Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russia (450062, Ufa, Kosmonavtov street, 1), e-mail: [KonesevSG@yandex.ru](mailto:KonesevSG@yandex.ru)

The paper presents the basic requirements for induction heating pipeline system, considering geometry of the object, as well as the heated fluid flow regimes. We consider plots and pipeline components that have geometrical features defining the requirements for execution of the inductor. Determine the structure of induction heating systems, and associated local impacts, ensuring the realization of the heating mode, and emergency heating. It is a block diagram of the induction heating system of pipelines and a circuit diagram of the induction heating system inductively capacitive transducer, which provides a charge a bank of capacitors at the maximum efficiency coefficient. An algorithm of engineering calculation of the induction heating system of pipelines, taking into account the features of geometry of the pipeline and its main units, hydraulic flow regimes and physico-chemical characteristics of the oil pumped by pipeline. The algorithm allows to calculate the basic energy and electrical characteristics of the induction heating system of pipelines.

Keywords: induction heating, engineering methodology, oil pipeline.

Объекты нефтегазовой отрасли разнообразны, а конфигурация системы нефтепроводов изменяется от месторождения к месторождению, от станции к станции, что требует индивидуального подхода в разработке индукционной нагревательной системы (ИНС). Основные элементы и участки нефтепровода представлены на рисунке 1.

Рассматриваемые объекты теплового воздействия (нефтепроводы) обладают рядом особенностей, среди них значительная протяженность объекта, длина которых превышает десятки километров, сложная конфигурация отдельных элементов и узлов (фланцы, задвижки, отводы и т.д.), геометрическая особенность (значительное отличие габаритов промышленного и магистрального нефтепровода). Следует также учитывать особенности

технологического режима, определяющегося гидравлическим течением жидкости и ее физико-химическими свойствами, которые влияют на значение внешнего температурного градиента.

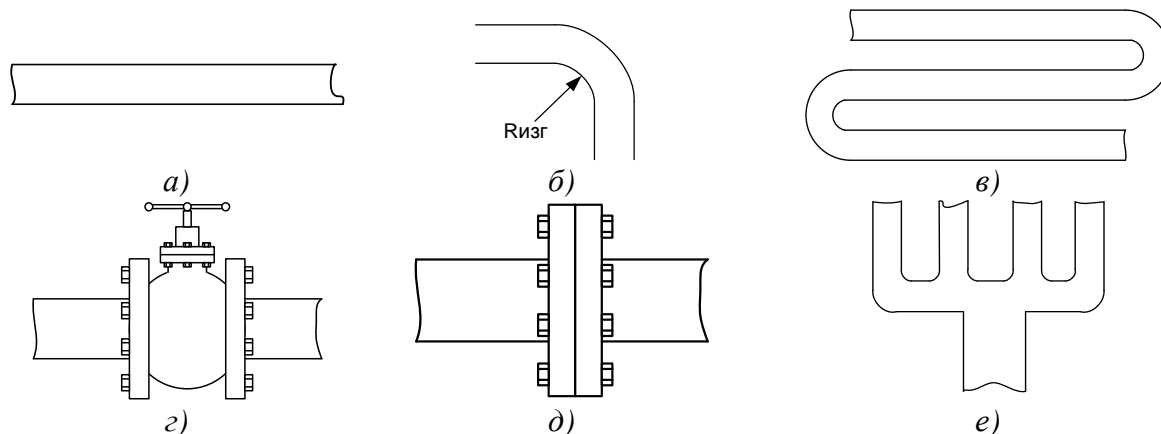


Рис. 1. Участки трубопровода сложной конфигурации:

а) линейный; б) изгиб; в) змеевик; г) задвижка; д) фланец; е) гребенка.

### Определение требований к ИНС нефтепроводов

По результатам проведенных исследований [2; 5-7] сформулированы основные требования к индукционной нагревательной системе, к которым относятся:

- обеспечение низкоградиентного температурного воздействия на перекачиваемую жидкость;
- реализация двух режимов нагрева:
  - а) поддержание температуры;
  - б) экстренный разогрев;
- создание двух способов воздействия:
  - а) локальный;
  - б) попутный;
- промышленная, пожарная и экологическая безопасность;
- функционирование в широком диапазоне рабочих мощностей для поддержания оптимального температурного воздействия с учетом физико-химических свойств перекачиваемой жидкости и режима течения;
- полная автоматизация процесса теплового воздействия;
- простота монтажа и эксплуатации системы;
- согласованный режим работы источника вторичного электропитания (ИВЭП) и индуктора при изменении нагрузки и влияния внешних факторов;
- соответствие требованиям нормативно-технической документации [1].

Для обеспечения промышленной, пожарной и экологической безопасности с помощью индукционной нагревательной системы необходимо формировать низкотемпературное и низкоградиентное тепловое поле, способствующее снижению

вероятности возгорания взрывоопасных смесей возле объекта, сокращению тепловых выбросов в окружающую среду, повышению долговечности системы и сведению к минимуму аварийных ситуаций, связанных с прогаром технологических труб и разливом нагреваемого продукта.

Формирование низкоградиентного температурного поля возможно благодаря равномерному распределению теплового потока по поверхности нагреваемого объекта и увеличению площади теплового воздействия [4], что недоступно с применением других нагревательных систем и устройств. Особенности технического исполнения и конфигурации теплообменников в разработанных авторами ИНС позволяют организовать мощный тепловой поток (локальный нагрев) и распределенный поток на протяженном участке (попутный нагрев). При этом каждая из систем имеет ряд особенностей, связанных с формированием теплового поля, которые отражаются на исполнении источника питания и расположении индуктора на поверхности объекта нагрева [3].

#### **Индукционная нагревательная система локального воздействия**

Индуктор располагается на продуктовом змеевике одним или несколькими витками сложной геометрии для обеспечения интенсивного теплового потока на сравнительно небольшой площади воздействия. Так как создание мощного ИВЭП для ИНС связано с использованием дорогостоящих полупроводниковых коммутационных ключей, то возможно исполнение локальной ИНС с несколькими источниками малой мощности.

При расположении индуктора одним витком возможно изменение значения интенсивности теплового потока посредством изменения конфигурации силовой части за счет смещения прямого и обратного проводника друг относительно друга по радиусу [8]. Для согласования источника питания и индуктора в схеме необходимо использовать согласующий трансформатор.

Применение локальной индукционной нагревательной системы способствует реализации различных систем нагрева, среди которых наиболее энергоэффективной является система локально-ступенчатого нагрева [2].

#### **Индукционная нагревательная система попутного воздействия**

Задача попутной индукционной нагревательной установки - в компенсации тепловых потерь, тем самым температурный градиент здесь имеет небольшое значение и не превышает 100 °С. Однако разрабатываемые системы индукционного нагрева рассчитываются таким образом, что могут реализовать режим экстренного разогрева, когда необходимо разморозить застывший участок трубопровода. В отличие от системы локального воздействия в схеме попутной индукционной нагревательной установки отсутствует согласующий трансформатор.

## Разработка алгоритма расчета ИНС нефтепроводов

Особенность инженерной методики заключается в совместном нахождении параметров системы «источник – индуктор – нагрузка» с учетом геометрии участка трубопровода, наличия узлов и элементов, требуемого температурного диапазона нагреваемого продукта. Принципиальная схема индукционной нагревательной системы с индуктивно-емкостным преобразователем, обеспечивающая заряд блока конденсаторов с максимальным КПД, представлена на рисунке 2а. Блок конденсаторов ИВЭП и индуктор представляют собой колебательный контур, параметры которого определяются активным  $R_k$  и индуктивным  $X_k$  сопротивлением индуктора и емкостью блока конденсаторов  $C_k$  (рис. 2б).

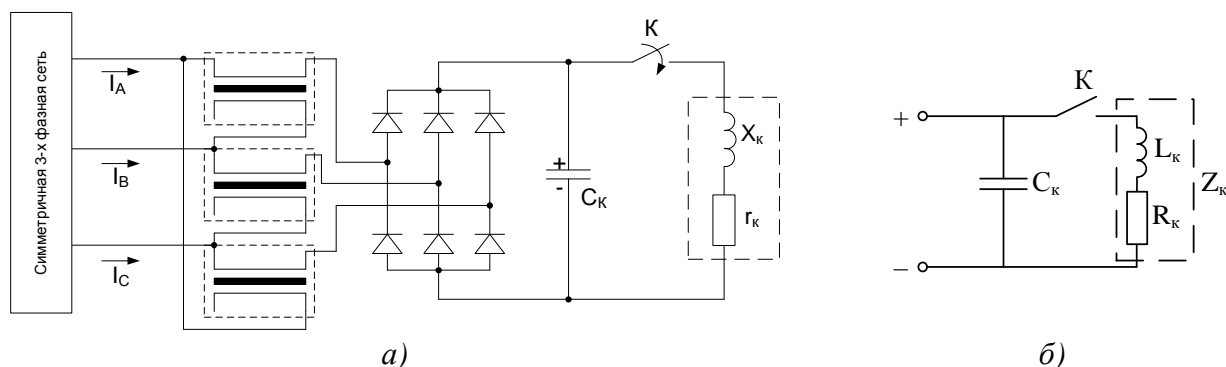


Рис. 2. Схема индукционной нагревательной системы с индуктивно-емкостным преобразователем и колебательный контур:

а) общая схема; б) колебательный контур «блок конденсаторов ИВЭП - индуктор».

Блок-схема индукционной нагревательной системы представлена на рисунке 3. Согласно приведенной схеме инженерная методика расчета должна содержать:

- расчет параметров источника вторичного электропитания (ИВЭП);
- расчет параметров «индуктор-нагрузка».

Частью методики также является решение тепловой задачи совместно с гидравлическим режимом течения.

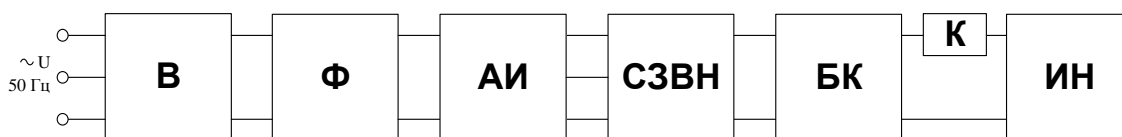


Рис. 3. Блок-схема индукционной нагревательной системы:

В – выпрямитель, Ф – фильтр, АИ – автономный инвертор, СЗВН – зарядный блок, БК – конденсаторный блок, К – коммутационный ключ, ИН – индуктор.

Так как объект нагрева может иметь различную геометрическую конфигурацию и включать различные элементы и узлы, вначале следует определить параметры источника вторичного электропитания, значения которых влияют на параметры «источник–нагрузка».

## Постановка задачи расчета параметров ИВЭП

Задача источника вторичного электропитания индукционной нагревательной системы - создать необходимую мощность в индукторе ИНС, значение которой определяется необходимой тепловой мощностью

$$P = \frac{Q_c}{n \cdot t}, \quad (1)$$

где  $Q_c$  – тепловая энергия;

$n$  – число установок индукционного нагрева;

$t$  – число секунд в сутках.

В свою очередь мощность, выделяемая в индукторе, определяется энергией, накапливаемой в блоке разрядных конденсаторов  $C_k$ , которую можно записать как

$$W_c = \frac{cU^2}{2}, \quad (2)$$

где  $C$  – емкость батарей блока разрядных конденсаторов;

$U$  – напряжение, подводимое к блоку батарей конденсаторов.

При этом энергия  $W_c$  выделяется за время, равное одному периоду, в течение которого конденсатор заряжается и разряжается

$$W_c = P \cdot T_k, \quad (3)$$

где  $P$  – мощность установки индукционного нагрева;

$T_k$  – период коммутации.

Из уравнений (2) и (3) получаем выражение для расчета емкости батареи конденсаторов:

$$C = \frac{2P}{f_k \cdot U^2}, \quad (4)$$

где  $f_k$  – частота коммутаций, Гц.

Выражение (2) описывает максимальную энергию батареи разрядных конденсаторов, которая равна максимальной энергии, рассеиваемой в индукторе

$$W_c = W_L = \frac{L \cdot i^2}{2}, \quad (5)$$

где  $L$  – индуктивность разрядного контура;

$i$  – ток индуктора.

Затуханию колебательного разряда в контуре способствует активное сопротивление индуктора  $R$ , критическое значение которого определяется как

$$R_{кр} = 2 \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} R > R_{кр} & \text{апериодический характер} \\ R < R_{кр} & \text{колебательный характер} \end{cases}$$

Потери в колебательном контуре характеризуются добротностью, которая записывается как

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (7)$$

В процессе работы индукционной нагревательной системы для разрядного контура частота коммутаций силового ключа должна находиться в следующем диапазоне:

$$f_{кр} \leq f_k \leq f_{рез}, \quad (8)$$

где  $f_{кр} = f(Q_{min})$  – критическая частота;

$$f_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}} - \text{резонансная частота.}$$

Критическая частота  $f_{кр}$  определяется минимальной тепловой мощностью, которая требуется для нагрева жидкости. Частота резонанса  $f_{рез}$  определяется параметрами разрядного контура емкостью блока разрядных конденсаторов, индуктивностью индуктора и активным сопротивлением.

Для решения поставленной задачи был разработан алгоритм инженерного расчета индукционной нагревательной системы (рис. 4).

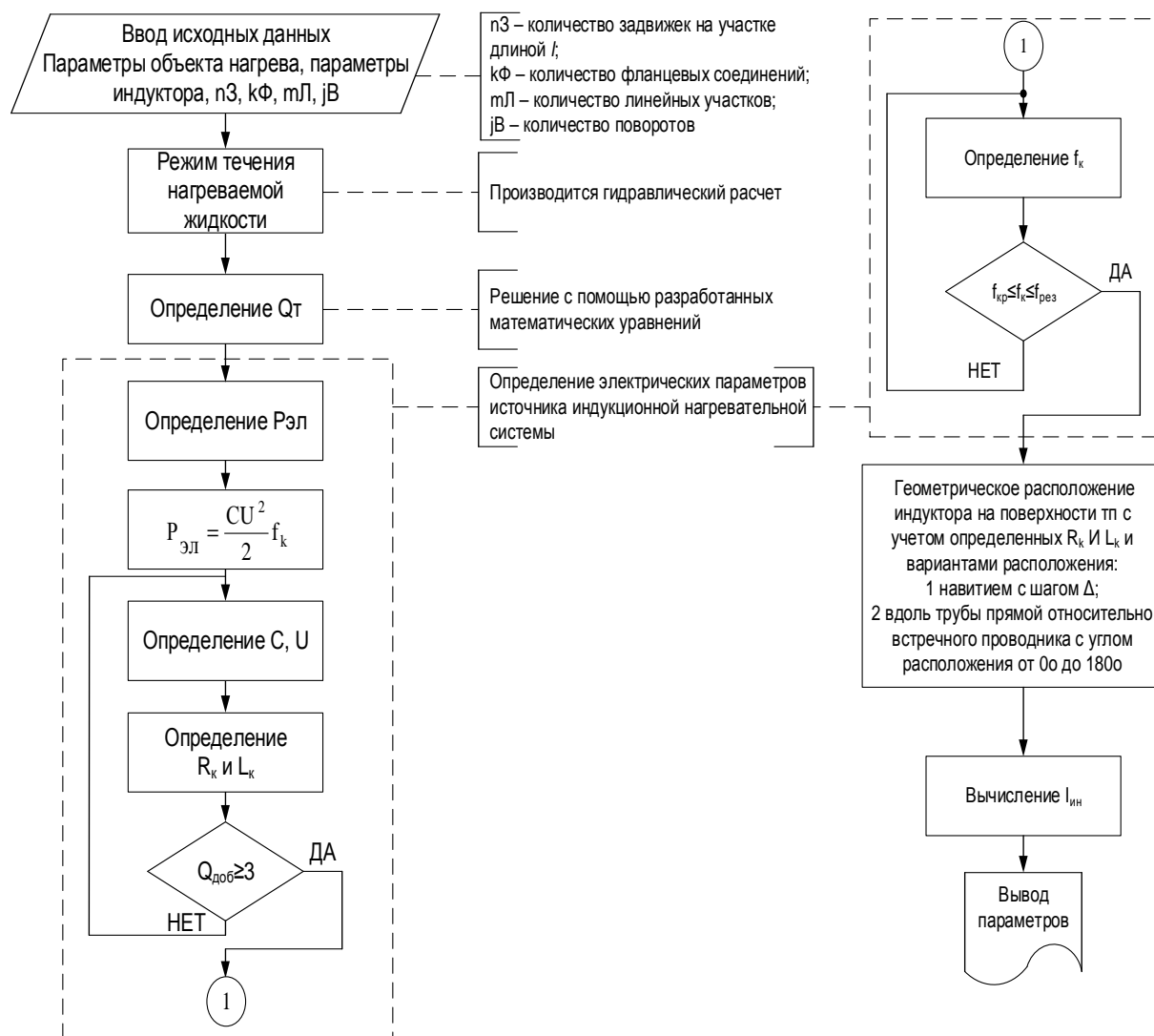


Рис. 4. Алгоритм инженерного расчета индукционной нагревательной системы нефтепроводов.

## Выводы

1. Определены основные требования к индукционной нагревательной системе нефтепроводов, учитывающие особенности сложной геометрии участков нефтепровода и физико-химический состав нагреваемого продукта.
2. Разработан алгоритм инженерного расчета индукционной нагревательной системы нефтепроводов, позволяющий рассчитать параметры источника вторичного электропитания и индуктора с учетом сложной геометрии поверхности нагрева.

### Список литературы

1. ГОСТ 16370-80. Установки и устройства индукционные электротермические средней частоты. Общие технические условия. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 7 с.
2. Конесев С.Г. Индукционные нагревательные системы для протяженных нефтепроводов / С.Г. Конесев, Р.В. Кириллов, Э.Ю. Кондратьев, М.Р. Садиков, Р.Т. Хазиева, П.А. Хлюпин // Нефтегазовое дело. – 2014. - Т. 12. - № 4. – С. 40–47.
3. Конесев С.Г. Регулирование реологическими свойствами вязких текучих сред / С.Г. Конесев, П.А. Хлюпин, К.И. Муслимов, Э.Ю. Кондратьев // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий : сб. науч. тр. I Межд. (IV Всерос.) науч.-техн. конф. – Уфа : Нефтегазовое дело, 2013. – С. 194–199.
4. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Математическая модель тепловых режимов изотермических трубопроводов // Вести высших учебных заведений Черноземья [Липецк: ЛГТУ]. – 2008. - № 3 (13). – С. 46–47.
5. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Оценка эффективности теплового воздействия электротермических систем // Нефтегазовое дело. - 2012. - Т. 2. – № 3. – С. 92–95.
6. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Экологичные нагревательные системы для объектов транспорта и хранения вязкой нефти // Безопасность жизнедеятельности. - 2012. – № 7. – С. 43–47.
7. Конесев С.Г., Хлюпин П.А., Садиков М.Р. Анализ эффективности применения нагревательных систем при перекачке вязких нефтей // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий : сб. науч. тр. III Всерос. науч.-техн. конф. (с межд. уч.). – Уфа : УГНТУ, 2011. – С. 211–218.
8. Конесев С.Г., Хлюпин П.А., Макулов И.А., Никитин Ю.А. Установка индукционного нагрева трубопроводов : Патент России № 2415517. 2011. Бюл. № 9.

**Рецензенты:**

Баширов М.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» филиала ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате;

Сапельников В.М., д.т.н., профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.