

На правах рукописи



Васильев Иван Владимирович

**Совершенствование индукционного
нагревательного комплекса
для термообработки вязких жидкостей**

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2018

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Данилушкин Александр Иванович**,
доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты: **Кувалдин Александр Борисович**,
Заслуженный деятель науки РФ, доктор
технических наук, профессор Национального
исследовательского Университета «МЭИ», г.
Москва

Конесев Сергей Геннадьевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Электроника и электрооборудование
предприятий» ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина
Ю.А.» г. Саратов

Защита состоится «26» февраля 2019 г. в 10-00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.217.04 ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул.
Первомайская, д. 18, корпус №1, ауд. 4А.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью)
просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,
Самарский государственный технический университет, Главный корпус,
ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; тел.: (846)278-44-
96, факс (846) 278-44-00; E-mail: a-ezhova@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская,
18)

Ученый секретарь диссертационного совета

к.т.н.



Е.В. Стрижакова

ВВЕДЕНИЕ

Диссертация посвящена проблеме снижения массогабаритных показателей индукционного нагревательного комплекса для термообработки вязких жидкостей перед транспортировкой.

Актуальность проблемы:

Транспортировка вязких и высоковязких нефтей по трубопроводам без предварительной обработки требует больших энергозатрат, поэтому для их транспортировки применяют специальные подготовительные способы, среди которых наиболее распространенным способом является предварительный подогрев. Известные конструктивные решения позволяют выполнить основную задачу – обеспечить подогрев нефти с требуемым качеством, однако, вследствие технологического ограничения на максимальную температуру и низкой теплопроводности нефти нагревательные установки имеют высокие массогабаритные показатели. Одним из способов снижения массогабаритных показателей нагревательной системы является использование устройств, повышающих интенсивность теплопередачи от тепловыделяющих стенок трубы в жидкость. Наиболее эффективными для этих целей представляются индукционные устройства, встроенные в нагревательную систему и выполняющие одновременно перемешивание и подогрев потока жидкости. Однако в настоящее время отсутствуют методики, позволяющие выполнить расчеты конструктивных и режимных параметров подобных устройств. Разработка методики расчета для разработки оптимальных конструктивных и режимных параметров нагревательного комплекса на базе уточненных математических моделей взаимосвязанных электротепловых, гидравлических и электродинамических процессов и рекомендаций по улучшению технико-экономических и эксплуатационных показателей нагревательных комплексов в целом, обеспечивающих эффективное функционирование трубопроводного транспорта, имеет важное значение и является актуальной.

Работа выполнялась в рамках фундаментальной НИР «Разработка методологии построения оптимальной многоуровневой системы управления трубопроводным транспортом» (гос. регистрационный № 15-08-03053) по заданию Министерства образования и науки РФ.

Целью работы является улучшение массогабаритных характеристик индукционного нагревательного комплекса для нагрева вязких жидкостей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие **основные задачи**:

- разработка математических моделей процесса нагрева движущейся нефти в системе «соленоидальный индуктор – труба – жидкость»;
- разработка математических моделей процесса нагрева движущейся нефти в системе «трехфазный индуктор с вращающимся полем – труба – ротор - жидкость»;
- разработка методики проектирования комплексной индукционной установки с функциями нагревателя и перемешивателя жидкости;

- разработка методики синтеза алгоритмов управления стационарными процессами нагрева и перемешивания жидкости.

Объект исследования – система косвенного индукционного нагрева движущейся вязкой жидкости.

Предмет исследования: моделирование электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов в системе нагрева нефти и алгоритмы оптимального проектирования и управления.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи использовались методы математического анализа, теории теплопроводности, преобразования Лапласа, теория электромагнитного поля, теория оптимального проектирования, теория автоматического управления, методы компьютерного моделирования. Для подтверждения достоверности результатов исследования проводился сравнительный анализ полученных характеристик с работами других авторов.

Научная новизна.

В диссертационной работе получены следующие основные научные результаты:

– математическая модель взаимосвязанных тепловых и гидравлических процессов в системе «труба – вращающийся ротор – жидкость», отличающаяся учетом взаимного влияния термических и гидравлических процессов;

– методика оптимального проектирования и управления связанными процессами нагрева и перемешивания жидкости, позволяющая повысить энергообмен между жидкостью и тепловыделяющей стенкой трубы;

– алгоритмы распределения мощности по длине индукционного нагревательного комплекса, в которых учитывались ограничения на удельную поверхностную мощность и условие максимальной температуры стенки трубы.

Полученные результаты дают возможность обеспечить более высокое качество при решении задач расчета индукционных установок для подогрева вязких жидкостей.

Практическая значимость работы. Прикладная значимость проведенных исследований определяется следующими результатами:

1. Разработанная оригинальная конструкция трехфазного индукционного устройства позволяет сократить общую длину многосекционного нагревателя за счет совмещения функций нагрева и перемешивания.

2. Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение для расчета электромагнитных, тепловых и гидравлических полей в трехфазной индукционной системе с вращающимся магнитным полем обеспечивают получение мощности тепловыделения и момента вращения ротора, необходимых для формирования заданного температурного распределения.

3. Разработанная структура системы автоматического управления индукционным нагревательным комплексом обеспечивает заданный режим работы комплекса с учетом технологических и энергетических ограничений.

Диссертация соответствует паспорту специальности: в части формулы специальности: « специальность, объединяющая исследования по процессам

преобразования электрической энергии в другие виды энергии с целью достижения определенного технологического эффекта»; в части области исследования: п. 3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнологических комплексов и систем, их оптимизация, разработка алгоритмов эффективного управления».

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации обеспечена строгим выполнением математических преобразований, принятием признанных допущений, использованием современных математических моделей и пакетов программ. Адекватность результатов и выводов подтверждается согласованностью с опубликованными результатами работ других авторов.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях (НТК):

3-ая Международная научно-практическая конференция – Курск: Юго-западный гос. Университет. 2013 г.; VIII международная молодежная научная конференция – Казань: КСГЭУ, 2013 г. Дни науки- 2014 69-я научно-техническая конференция студентов и магистрантов СамГТУ; 71-й Всероссийская научно-технической конференции по итогам НИР 2013 года; III Всесоюзная научно-техническая конференция. – Тольятти, 2014; Интерстроймех 2014 Международная научно-техническая конференция. 2014 г.; Международная научно-техническая конференция Москва 2015. Международная научно-техническая конференция Челябинск, РИО МЦИИ «ОМЕГА САЙНС» 2015 г.; Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия 16 Международная научно-практическая конференция г. Новосибирск. 2015 г.; Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия 16 Международная научно-практическая конференция г. Новосибирск. 2015 г.; Тинчуринские чтения» Материалы XI международной молодежно научная конференция – Казань: КСГЭУ, 2016 г.; 4-я Международ. конференция Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. АСИ СамГТУ. Самара, 2017 г.; V Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы электротехники, электроэнергетики электротехнологии» (ПЭЭЭ-2017), ТГУ, Тольятти, 2017 г.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 27 печатных работ, из них 5 работ в изданиях по перечню ВАК.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов в системе «трехфазный индуктор – труба – вращающийся ротор – жидкость», учитывающая взаимное влияние термических и гидравлических процессов;
2. Методика расчета параметров трехфазного индуктора с вращающимся магнитным полем для нагрева и перемешивания жидкости.
3. Методика оптимального проектирования и управления связанными

процессами нагрева и перемешивания жидкости для многосекционной индукционной установки, совмещающей функции нагрева и перемешивания.

4. Алгоритм распределения мощности по длине индукционного нагревательного комплекса, в котором учитывались ограничения на удельную поверхностную мощность и максимальную температуру стенки трубы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, изложенных на 139 страницах машинописного текста; содержит 77 рисунков и 7 таблиц, список использованных источников, включающий 133 наименования и 1 приложение.

Краткое содержание работы:

Во введении приводится краткое описание проблемы и состояние на сегодняшний день методов математического моделирования, описывается актуальность темы, формируется цель исследования и ряд задач, требующие решения, формулируется новизна, и практическая значимость, и положения выносимы на защиту.

В первом разделе рассмотрены существующие способы и средства термической обработки нефти при подготовке ее к транспортировке по нефтепродуктопроводам. Приведен обзор трудов математического моделирования индукционного нагрева, которые сочетали в себе задачи проектирования конструкций, различных режимов работы индукторов, а так же систем управления для нагревателей.

Показано, что, несмотря на достигнутые результаты в области совершенствования методик расчета индукционных нагревателей, способов и систем управления, остается ряд нерешенных вопросов, связанных с требованиями к снижению энергоемкости установок для нагрева вязких жидкостей. В настоящей работе задача повышения интенсивности теплообмена между источником тепла и нагреваемой жидкостью решена с помощью применения трехфазного индуктора с вращающимся магнитным полем, обеспечивающего перемешивание и подогрев жидкости в процессе её прохождения через нагревательную систему. Приведена постановка задачи исследования, заключающаяся в разработке методики оптимального проектирования многосекционного индукционного нагревателя на основе уточненных математических моделей взаимосвязанных термических и гидравлических процессов.

Во втором разделе разработан комплекс математических моделей в рассматриваемой системе разнородных по физической структуре тел, включающий в себя моделирование электромагнитных процессов в системе «цилиндрический индуктор – металлическая труба», моделирование электромагнитных и электродинамических процессов в системе «трехфазный индуктор – металлическая труба – вращающийся ротор», моделирование

взаимосвязанных термических и гидравлических процессов в системе «тепловыделяющая труба - поток жидкости. Математическая модель описывается нелинейной связанной системой уравнений Максвелла, Фурье и Навье–Стокса с соответствующими краевыми условиями:

$$\begin{cases} \text{rot } \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; \text{ div } \mathbf{H} = 0; \\ \text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \text{ div } \mathbf{E} = 0; \end{cases} \quad (1)$$

$$c(T)\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T)\text{grad } T) - \text{div}[\mathbf{EH}];$$

(2)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v(\nabla v) = -\frac{1}{\gamma} \text{grad } P + \frac{1}{\gamma} (\mu_e \nabla v) \quad (3)$$

Здесь \mathbf{H} , \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{D} – векторы напряженностей магнитного и электрического полей, магнитной и электрической индукции, $c(T)$, γ – удельные значения теплоемкости и плотности, $T = T_n(r, y, t)$ – температурное распределение, $\Pi = -\text{div}[\mathbf{EH}]$ – объемная плотность внутренних источников тепла, \mathbf{V} - вектор скорости, t - время, P – давление, μ_e - эффективная вязкость, γ – плотность.

Вычисление распределения температуры выполнялось на модели, которая включала в себя несколько моделей: модель электромагнитных процессов в системе «индуктор-труба-ротор»; модель Навье–Стокса для расчета распределения скорости потока по сечению; модель нестационарной теплопроводности в системе «тепловыделяющая труба – поток жидкости».

Эскиз индукционного нагревателя, состоящего из цилиндрического индуктора и ферромагнитной трубы с внутренним оребрением, представлен на рис. 1.

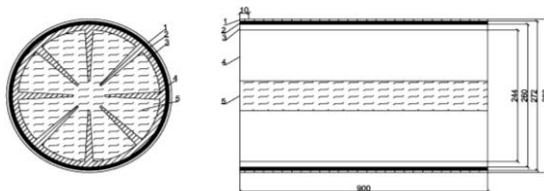


Рис 1. Конструкция нагревателя в разрезе
1-Витки индуктора; 2-Изоляция; 3-Труба; 4-ребра; 5-Нефть;

В трехфазном индукторе, состоящем из цилиндрического магнитопровода, в пазах которого расположена трехфазная обмотка, трубы из немагнитной стали и встроенного в полость трубы ротора (рис.2), электрическая энергия превращается в электромагнитную энергию вращающегося поля, причем, одна часть энергии преобразуется в тепловую энергию, а другая часть – в механическую энергию вращения ротора-смесителя.

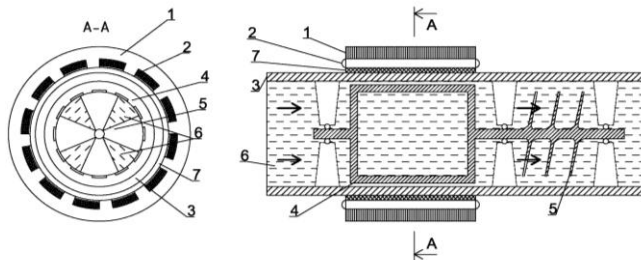


Рис.2. Эскиз трехфазного индуктора:

- 1 – магнитопровод индуктора, 2 – пазы обмотки индуктора, 3 – внешняя труба, 4 – ротор, 5 – смеситель, 6 – поток нагреваемой жидкости, 7 – изоляция

Полученный комплекс моделей позволил разработать методику расчета конструктивных и режимных параметров многосекционного индукционного нагревателя, который смог бы обеспечивать необходимые, технологические и энергетические характеристики для заданного процесса, а также обеспечивал необходимую точность подогрева.

Третий раздел посвящен исследованию электротепловых процессов в трехфазном индукторе с вращающимся магнитным полем. Индукционные устройства для перемешивания жидкостей, рассмотренные в настоящей работе в комплексе с однофазными индукционными нагревателями, имеют ряд особенностей, отличающих их с точки зрения моделирования электротепловых процессов от известных. Основное отличие заключается в преобразовании подводимой к индуктору электрической энергии в механическую энергию для перемешивания и в тепловую энергию для нагрева жидкости. При разработке и исследовании трехфазного индукционного устройства для нагрева и перемешивания нагреваемой жидкости решены следующие задачи: моделирование электромагнитных и тепловых полей в системе «трехфазный индуктор-труба-полый ротор-поток жидкости»; разработка алгоритма и методики расчета конструктивных и режимных параметров трехфазного устройства для нагрева и перемешивания потока жидкости; исследование энергетических характеристик устройства на основе уточненных математических моделей и разработка рекомендаций по его применению.

На рис.3 представлены интегральные значения мощности тепловыделения в роторе, а на рис.4 –интегральное значение полного крутящего момента ротора.

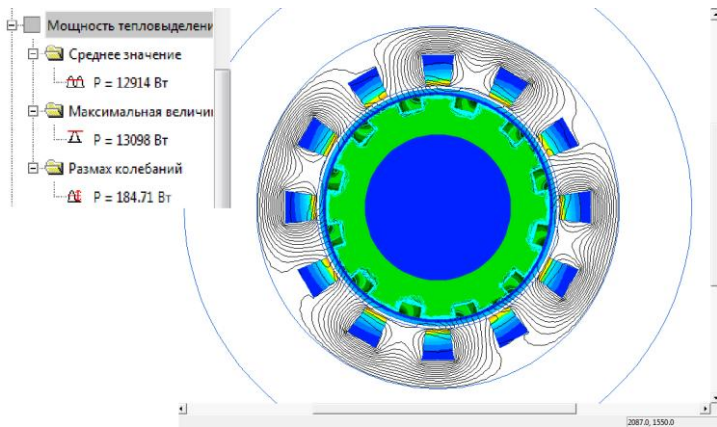


Рис. 3. Мощность тепловыделения в роторе

На рис.5 представлен график распределения плотности тока в различных элементах устройства с одной парой полюсов. где первый участок – плотность тока в обмотке, второй участок – плотность тока в трубе из нержавеющей стали, третий участок – плотность тока в беличьей клетке ротора. Отсчет расстояния ведется от дна паза статора. С целью оценки эффективности устройства и соотношения между мощностью, идущей на вращение ротора и мощностью, идущей на нагрев, был произведен расчет электрических, тепловых параметров и величины вращающего момента для различных схем соединения обмоток индуктора.

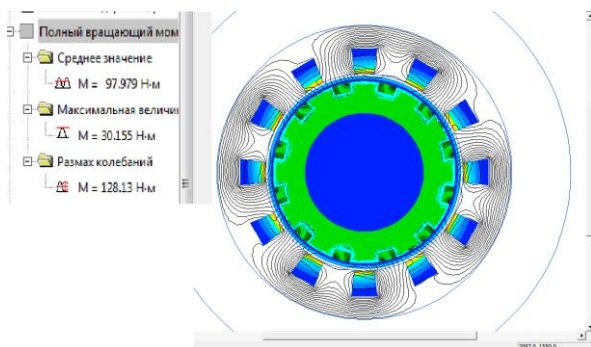


Рис. 4. Вращающий момент ротора

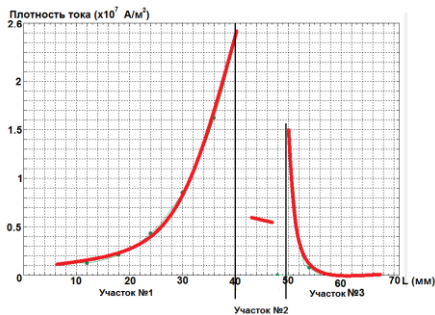


Рис. 5. Плотность тока в элементах устройства

На рис.6 представлено сравнение значений полного вращающего момента ротора для двух вариантов схем соединения катушек индуктора – при двухполюсной схеме соединения и при четырехполюсной.

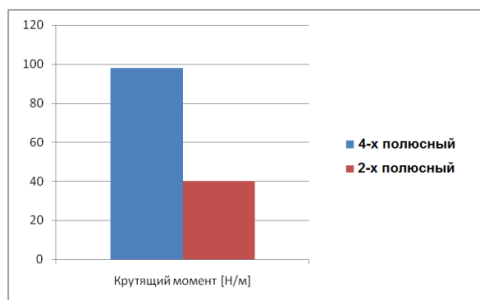


Рис. 6. Вращающий момент для двух схем соединения катушек

На рис.7 представлено сравнение значений объемного тепловыделения в роторе для двух вариантов схем соединения катушек индуктора.

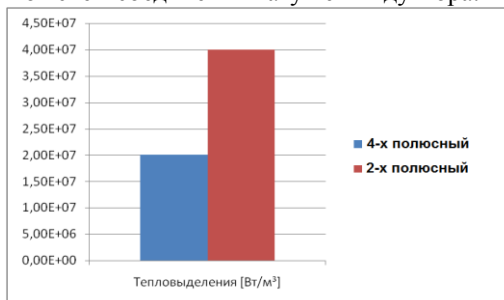


Рис. 7. Тепловыделение в роторе для двух схем соединения катушек

Как следует из сравнительного анализа, мощность тепловыделения при двухполюсной системе увеличилась более чем в два раза по сравнению с четырехполюсной. В то же время вращающий момент существенно уменьшился. Следовательно, изменение схемы соединения катушек индуктора можно использовать для выбора оптимального режима работы устройства в зависимости от реологических свойств нефти.

В четвертом разделе разработана методика и алгоритм для решения взаимосвязанной электромагнитной и тепловой задач, которая базируется на разработанной во 2 разделе математической модели для однофазного индуктора, состоящего из стальной трубы с внутренним оребрением, на которую намотана катушка индуктора. Применение одной трубы с внутренним оребрением позволяет применять более высокую частоту (напр., 500 ÷ 2500Гц), увеличить удельную мощность нагрева, снизить массу нагревателя по сравнению с известным вариантом с внутренним вытеснителем, значительно повысить коэффициент мощности системы.

Решение задачи производилось в комплексе программ Comsol. Из-за ограниченной мощности компьютера методика расчета отработывалась на модели ограниченной длины. На рис.8 представлена модель с нанесенной сеткой конечных элементов. Для исследования влияния частоты на энергетические показатели нагревателя проведены расчеты параметров нагревателя на частотах 50, 500, 1000 и 2500Гц. На рис.9 показано распределение плотности тока в витках индуктора и в стенке оребренной трубы для частот 50 Гц и 500 Гц.

Анализ результатов расчета в диапазоне частот 500÷2500Гц показал, что максимальный электрический КПД установки достигается при работе на частоте 500Гц. Для частоты 500Гц выполнен расчет тепловых характеристик нагревателя. На рис.10 представлена картина распределения температуры в элементах устройства.

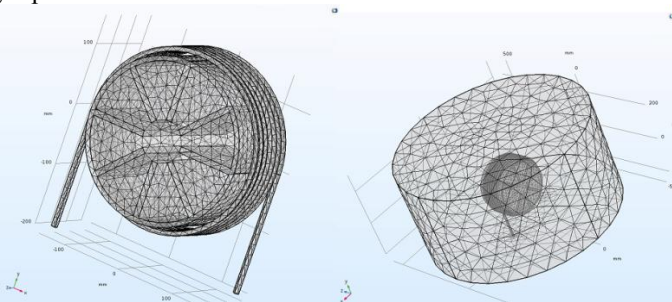


Рис. 8. Расчетная трехмерная модель однофазного индуктора

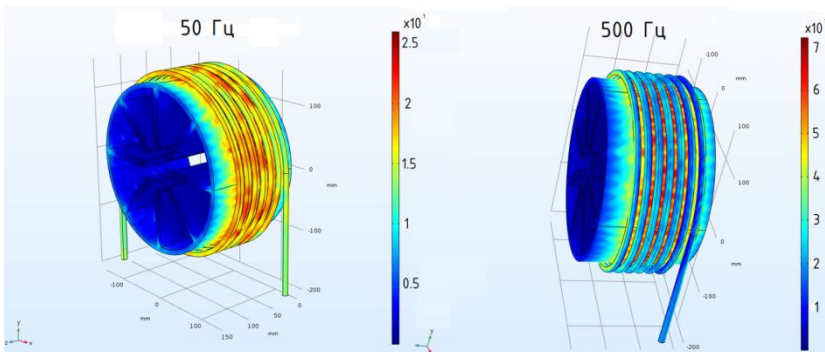


Рис. 9. Распределение плотности тока при частоте 50 Гц, 500 Гц.

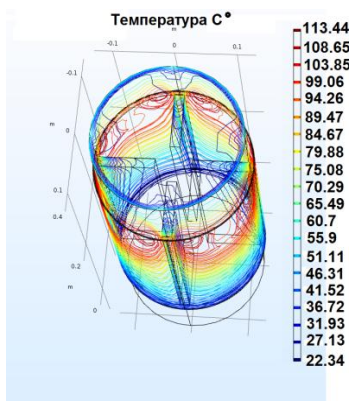


Рис.10. Температурное распределение в элементах устройства

Как следует из расчетов, наличие внутреннего оребрения приводит к увеличению площади теплообмена, однако, для получения практического эффекта необходимо увеличивать число ребер, что позволит увеличить подводимую к индуктору мощность и повысить температуру жидкости на выходе из однофазного индуктора. В работе приведены рекомендации по определению оптимального числа ребер в зависимости от диаметра тепловыделяющей трубы.

В пятом разделе рассмотрены вопросы оптимизации конструктивных параметров индукционного нагревательного комплекса. Для высокопроизводительных устройств подогрева нефти одной из главных задач является улучшение массогабаритных показателей за счет минимизации длины многосекционного нагревателя. Задача уменьшения длины нагревательного комплекса формулировалась следующим образом. Для объекта, описываемого системой уравнений (1) ÷ (2), требуется найти в классе кусочно–постоянных функций стесненное ограничениями вида

$$0 \leq P(x) \leq P_{\max}; T(R, x) \leq T_{\text{дон}} \quad (5)$$

распределение удельной мощности $P_{\text{онм}}(x)$, обеспечивающее при минимальной общей длине L многосекционного нагревателя заданную по технологии температуру жидкости в выходном сечении ($x = L$) с допустимым отклонением ΔT

$$\max |T_{\text{cp}}(L) - T_{\text{зад}}(L)| \leq \Delta T \quad (6)$$

Здесь $P(x)$ – распределение удельной мощности по длине многосекционного нагревателя, x – пространственная координата, P_{\max} – максимальное значение удельной мощности, $T(R, x)$ – температура пограничного слоя жидкости, $T_{\text{cp}}(L)$ – средняя по сечению температура жидкости в выходном сечении нагревателя, $P_{\text{онм}}(x)$ – оптимальное распределение удельной мощности.

Существенным отличием процедуры поиска оптимального алгоритма распределения мощности по секциям является наличие участков перемешивания, мощность которых делится на два потока: на создание вращающего момента и на нагрев жидкости. В зависимости от вязкости жидкости и производительности трубопровода распределение мощности в процессе работы между этими двумя потоками изменяется, поэтому в алгоритм расчета оптимальной длины встроена дополнительная подпрограмма расчета мощности смесителя. На рис.11 представлен оптимальный график распределения мощности индукционного нагревательного комплекса, состоящего из четырех однофазных индукционных нагревателей и четырех трехфазных смесителей соответственно.

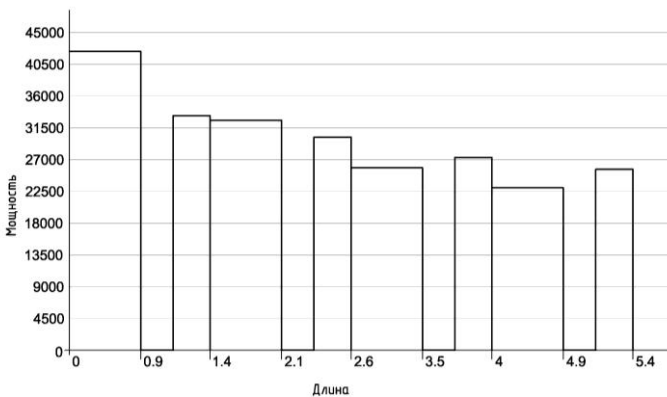


Рис. 11. Оптимальное распределение мощности по длине нагревателя.

На рис. 12 приведен график температуры по длине исследуемого индукционного комплекса при оптимальном распределении мощности и при наличии индуктора с использованием пассивного смесителя. Конструктивные размеры нагревателей приняты одинаковыми. Здесь 1 – температура внутренней поверхности стенки трубы нагревателя соответственно с учетом трехфазного индуктора для перемешивания и без него; 2 – средняя по сечению потока температура жидкости по длине нагревателя с учетом трехфазного индуктора и без него.

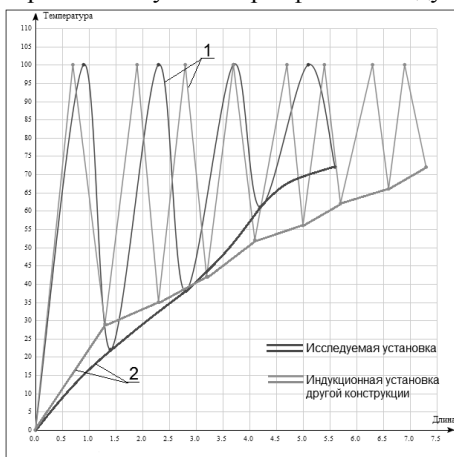


Рис. 12. Распределение температуры по длине нагревателя при оптимальном распределении мощности по секциям.

Как следует из результатов расчета, в исследуемой установке с использованием трехфазного индуктора для перемешивания жидкости длина индукционной системы уменьшается примерно на 30%.

Шестой раздел посвящен разработке системы управления индукционным нагревательным комплексом, обеспечивающим заданные характеристики процесса при действующих на систему возмущениях.

Функциональная схема нагревательного комплекса с системами регулирования для каждой автономной секции представлена на рис. 13.

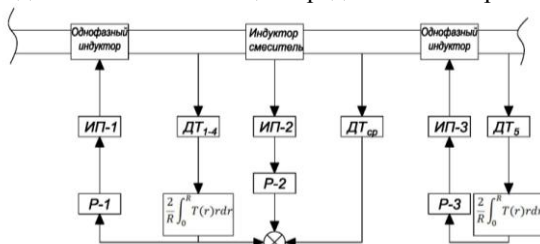


Рис. 13. Функциональная схема нагревательного комплекса с системами регулирования для каждой автономной секции

Для управления нагревательным комплексом разработаны две принципиально различные системы. Система регулирования однофазным индукционным нагревателем реализована как система стабилизации с обратной связью по среднему значению температуры движущегося потока на выходе из трехфазного индуктора. В работе установлена связь между распределением температуры и средним значением температуры по сечению жидкости. Для анализа средней по сечению температуры применяется следующая зависимость:

$$T_{cp} = \int_0^R T(r) r dr$$

Значение температурного распределения по радиусу аппроксимируется кусочно-линейной функцией, которая состоит из прямых отрезков с концами в точках измерения температуры.

Для синтеза систем регулирования проведен анализ динамических свойств системы “индуктор – металл – жидкость. Процесс косвенного индукционного нагрева потока жидкости с учетом обоснованных допущений описывается уравнением теплопроводности с внешними источниками тепла в форме теплового потока с поверхности тепловыделяющего элемента

$$\frac{\partial T(r, x, t)}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial r} \right] - V \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial x};$$

Используя последовательно интегральное преобразование Лапласа по времени и конечное интегральное преобразование Ханкеля по радиусу, получена передаточная функция индукционного нагревателя в виде

$$W(r, p, x) = \frac{K_0}{T_0 p} \left(1 - e^{-\frac{p}{V} x} \right) + \frac{2R}{\lambda \mu_n^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)}{J_0(\mu_n) \cdot (T_n p + 1)} \left(1 - e^{-\frac{x}{T_n V}} \cdot e^{-\frac{p}{V} x} \right)$$

Структурная схема замкнутой системы с обратной связью по средней температуре жидкости представлена на рис. 14.

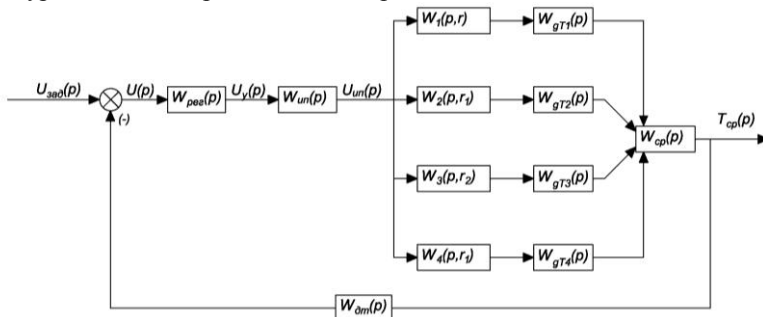


Рис.14. Структурная схема системы управления индукционным нагревателем

Основной задачей автоматической системы управления трехфазным индуктором является эффективное перемешивание жидкости с целью получения одинаковой по всему сечению потока температуры, равной средней температуре в выходном сечении потока. Качество перемешивания определяется двумя факторами: частотой вращения ротора–смесителя и вязкостью жидкости. Зависимость качества перемешивания от частоты вращения ротора при постоянной вязкости представляет собой нелинейную функцию. Для поиска оптимальной частоты вращения разработана следящая система, в которой задающий сигнал формируется с помощью интегрирующего устройства по информации о температурном распределении по сечению потока на входе в смеситель. В предлагаемой системе частота вращения регулируется с помощью преобразователя частоты, подключенного к трехфазному индуктору.

В работе предложены варианты конструктивного исполнения индукционного нагревательного комплекса для технологического нагрева жидкости в зависимости от требуемой производительности и характеристик нефти.

Заключение

В работе получены следующие основные результаты.

- Разработана методика синтеза оптимальных алгоритмов пространственного распределения мощности многосекционного индукционного нагревательного комплекса, обеспечивающая улучшенные массогабаритные показатели;
- Разработаны методика и алгоритм решения комплексной задачи тепломассопереноса при нагреве потока жидкости в многосекционном индукционном нагревательном комплексе;
- Предложена математическая модель взаимосвязанных электромагнитных, электродинамических и тепловых процессов;
- Разработана методика расчета параметров трехфазного индуктора с вращающимся магнитным полем для нагрева и перемешивания жидкости;
- Исследованы энергетические характеристики трехфазного индуктора с вращающимся магнитным полем;
- Разработан многосекционный индукционный нагревательный комплекс с улучшенными массогабаритными показателями, включающий однофазные индукционные нагреватели, трехфазные индукционные устройства для перемешивания и автоматизированную систему управления комплексом на базе микропроцессорной техники.

Рекомендации

1. Результаты проведенного научного исследования рекомендуется внедрять в нефтегазовой отрасли, при подготовке вязких и высоковязких нефтей для транспортировки по промысловым и магистральным трубопроводным системам.
2. Разработанная методика оптимального проектирования может быть использована предприятиями, занимающимися разработкой и

проектированием нагревательных систем для производства растительных масел в пищевой промышленности, а так же разработкой и проектированием автономных отопительных систем.

3. Результаты диссертационных исследований рекомендуется использовать в учебном процессе при чтении лекций, при выполнении выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров по направлению подготовки 13.03.02 «Электротехника и электротехника».

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшая разработка темы может быть направлена на создание эффективных алгоритмов управления переходными режимами индукционного нагревательного комплекса при первоначальном пуске трубопроводной системы из холодного состояния, при смене производительности или изменении параметров перекачиваемой нефти. Перспективным направлением в области разработки систем управления является синтез замкнутых оптимальных систем и их техническая реализация.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в изданиях по перечню ВАК:

1. Васильев И.В. Моделирование электромагнитных процессов в многослойной трехфазной индукционной цилиндрической системе [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин В.А., Данилушкин А.И., Базаров А.А.// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Выпуск №3(55)–2017: Самара: СамГТУ, 2017. С. 50–60
2. Васильев И.В. Экономичная система электронагрева экструдера в линии производства пенополистирольных плит [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин В.А., Данилушкин А.И.// Н-техн. журнал «Градостроительство и архитектура», Т.7, №2, СамГТУ, Самара, 2017, с. 125–132
3. Васильев И.В. Энергоэффективность технологический комплекс для нагрева вязкой жидкости [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин В.А., Данилушкин А.И., Базаров А.А.// Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. № 4 (25). С. 127-133.
4. Васильев И.В. Трехфазный индуктор с вращающимся магнитным полем для нагрева массивных заготовок [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин В.А., Данилушкин А.И., Базаров А.А.// Ж-л известия высших учебных заведений ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА.– 2016.
5. Васильев И.В. Многосекционная установка косвенного индукционного нагрева
6. жидкости. [Текст] / Данилушкин А.И., Кривошеев В.Е., Васильев И.В.// Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», Самара: СамГТУ, 2018г. Вып. № 1 (57). С.92–101.

Работы в других журналах и материалах научных конференций:

7. Васильев И.В. Моделирование процесса непрерывного индукционного нагрева заготовок подшипниковых колец как объекта управления [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин А.И., Пименов Д.Н.// Вопросы электротехнологии. Науч.-техн. журнал. - Саратов: СГТУ имени Гагарина Ю.А, ноябрь 2013 С.15-20.
8. Васильев И.В. Применение систем индукционного нагрева в технологических комплексах подготовки и переработки нефти и нефтепродуктов [Текст] /Васильев И.В.,

Данилушкин В.А., Зубарев С.А.// В сб.: Современные инновации в науки и техники. Материалы 3-ей Международной науч. - практич. конф. – Курск: Юго-западный гос. Университет. 2013. – С. 46-50

9. Васильев И.В. Синтез системы автоматического управления процессом индукционного нагрева пластины в поперечном магнитном поле [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин А.И., Пименов Д.Н.// В сб.: «Тинчуринские чтения» Материалы VIII международной молодежно научн. конф. – Казань: КСГЭУ, 2013.-С.6-7

10. Васильев И.В. Математическая модель индукционного нагрева шаров подшипника перед закалкой [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин А.И., Куликов А.М.// В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре, электронный ресурс: материалы 71-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2013 года. под редакцией М.И. Бальзаникова, Н.Г. Чумаченко. 2014. С. 968-969.

11. Васильев И.В. Исследование электромагнитных и тепловых полей при косвенном индукционном нагреве жидкости [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин В.А., Зубарев С.А.// В сб.: Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов. Сбор. Трудов III Всесоюз. научн.-тех. конф. – Тольятти: Изд. ТГУ, 2014 – С. 257-259.

12. Васильев И.В. Система индукционного нагрева для технологического комплекса производства пенополистирольных плит [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин А.И., Ошкин Я.М.// В сборнике: Интерстроймех 2014 Материалы Международной научно-технической конференции. 2014. С. 111-116.

13. Васильев И.В. Оптимизация длины индукционной установки непрерывного действия для нагрева жидкости [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин А.И., Ошкин Я.М.// Вопросы электротехнологии. 2014. № 2 (3). С. 11-16.

14. Васильев И.В. Индукционная установка для нагрева и перемешивания жидкости [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин А.И. // В сб.: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. Международная науч.-техн. конф. Москва: Изд. Дом МЭИ 2015. - С.240

15. Васильев И.В. Моделирование электромагнитных и тепловых полей при косвенном индукционном нагреве жидкости в трехфазном индукторе [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин А.И., Скляров Е.В.// В сб.: Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия 16 Международная науч.-практ. конф. г. Новосибирск. 2015. с. 71-74

16. Васильев И.В. Система электронагрева вязких нефтепродуктов [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин А.И., Скляров Е.В.// В сб.: Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия 16 Международная науч.-практ. конф. г. Новосибирск. 2015. с. 77-79.

17. Васильев И.В. Проектирование индукционной системы минимальной длины для нагрева жидкости [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин В.А.// Евразийский союз ученых. 2015. № 10-2 (19). С. 58-60.

18. Васильев И.В. Минимизация длины индуктора для нагрева жидкости [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин А.И.// В сб.: «Тинчуринские чтения» Материалы XI международной молодежно научн. конф. – Казань: КСГЭУ, 2016.-С.176

19. Васильев И.В. Энергоэффективная индукционная система для нагрева и перемешивания жидкости [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин В.А.// Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VII межд. научно-практ. конф.–Саратов: ООО «ЦеСаин» 2016. с. 40–42.

20. Васильев И.В. Исследование и анализ энергетических параметров индукционного нагревателя жидкости [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин В.А., Данилушкин А.И.// В сб.: 6-я Международная научно-практическая конференция «Современные материалы, техника и технология» - практич. конф. – Курск: Юго-западный гос. Университет. 2016.
21. Васильев И.В. Структурно-аналитическое моделирование процесса методического индукционного нагрева [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин В.А., Данилушкин А.И.// Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2016. № 12 (94). С. 102-108
22. Васильев И.В. Применение систем индукционного нагрева в технологических комплексах подготовки и переработки нефти [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин А.И.// Ашировские чтения. 2016. Т. 2. № 4-4 (8). С. 347-352.
23. Васильев И.В. Оптимизация стационарных и переходных режимов индукционных нагревателей непрерывного действия [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин А.И.// Сб. трудов. V Всероссийская научно-техн. конференция «Проблемы электротехники, электроэнергетики электротехнологии» (ПЭЭЭ-2017), ТГУ, Тольятти, 2017, с. 368-376.
24. Васильев И.В. Оптимизация стационарного режима двухсекционного индукционного нагревателя [Текст] /Васильев И.В., Данилушкин В.А., Данилушкин А.И.// Научно-технический журнал «Вопросы электротехнологии», №1 (14), СГТУ, Саратов, 2017, с. 20–26

Личный вклад автора. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: в работах [1, 3, 5, 9, 10] – численные эксперименты по расчету электромагнитных полей, в работе [2, 4, 8, 14, 18] – уточненная математическая модель электромагнитных процессов, в ряде работ [13, 15, 16, 17, 19, 20] – представлена математическая модель тепловых процессов, в работах [1,2,4,5,6, 8, 12, 23] – проведены численные исследования и их анализ, [22, 23] – расчеты оптимальных параметров двухсекционного индукционного нагревателя.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

(протокол № 11 от 18 декабря 2018 г.)

Заказ № ____ Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244