

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Васильев Иван Владимирович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО
НАГРЕВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

05.09.10 «Электротехнология»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор

Данилушкин Александр Иванович

Самара – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ПРОБЛЕМА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ НАГРЕВА ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ.....	15
1.1 Способы и средства нагрева вязкой и высоковязкой нефти при транспортировке по трубопроводам	16
1.2 Задача совершенствования конструкции и режимов работы индукционной системы технологического нагрева вязкой жидкости	18
1.3 Обзор методов математического моделирования и оптимизации процессов индукционного нагрева.....	23
1.4 Постановка задачи исследования	28
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОСВЕННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	35
2.1 Моделирование электромагнитных процессов.....	36
2.2. Математическая модель тепловых процессов в цилиндрической системе «индуктор – труба – жидкость»	38
2.3. Математическая модель гидравлических процессов	40
2.4. Математическая модель электротепловых процессов в трехфазном индукторе	41
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОМ ИНДУКТОРЕ С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ	46
3.1. Конструкция трехфазного индуктора для перемешивания и нагрева... 46	
3.2. Моделирование электротепловых процессов	47
3.3. Исследование влияния числа пар полюсов индуктора на энергетические характеристики устройства.....	50
3.4. Расчет вращающего момента для исследуемой установки	59
4. РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ.....	66
4.1. Расчет электромагнитных источников тепла в двухмерной задаче	68
4.2. Исследование электромагнитных и тепловых процессов в трехмерной области	74

4.3. Исследование термогидравлических процессов.....	83
5. ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИНЫ МНОГОСЕКЦИОННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ.....	88
5.1. Структура индукционного нагревательного комплекса	89
5.2. Постановка и решение задачи оптимального проектирования.....	92
6. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ.....	99
6.1. Передаточная функция объекта управления.....	100
6.2. Реализация системы автоматического управления нагревом	105
6.4. Система управления индукционным устройством.....	107
для перемешивания жидкости	107
6.5. Система управления нагревательным комплексом	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ	130

ВВЕДЕНИЕ

В диссертации рассмотрена проблема снижения массогабаритных показателей индукционного нагревательного комплекса для нагрева вязкой нефти.

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. Наиболее безопасными, экологически чистыми и высоконадежными способами подогрева являются различные способы электрического нагрева. К процессу нагрева нефти для её транспортирования предъявляются жесткие условия по температурному диапазону, градиенту температуры, а также требования по обеспечению пожарной и эксплуатационной безопасности. Функционирование трубопроводных систем осуществляется в условиях переменной производительности, вязкости нефти и изменяющихся внешних воздействиях, прежде всего температуры окружающей среды. Следовательно, системы подогрева должны обеспечить стабилизацию температурного режима в установившихся режимах при постоянной производительности трубопровода и высокое быстродействие при отработке глубоких возмущений при смене производительности. Обеспечить перечисленные выше требования к процессу нагрева вязкой нефти на магистральных и промысловых трубопроводах с наибольшим эффектом можно с помощью разработки и внедрения систем индукционного нагрева на промышленной или повышенной частотах. Для тепловой обработки вязких высокопарафинистых нефтей предлагаются разнообразные конструктивные решения, позволяющие обеспечить локальный или распределенный нагрев трубопроводов. Известные конструктивные решения

позволяют выполнить основную задачу – обеспечить подогрев нефти с требуемым качеством, однако, вследствие заданной максимальной температуры и низкой теплопроводности нефти нагревательные установки имеют высокие массогабаритные показатели. Указанное обстоятельство снижает эффективность использования индукционных нагревателей для нагрева вязких неэлектропроводных жидкостей с низкой теплопроводностью. 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. Применение предлагаемого устройства в комплексе с основными однофазными индукционными подогревателями позволит эффективно уменьшить габаритные характеристики комплекса. Однако, на сегодняшний день нет известных методик, позволяющих 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 уменьшение габаритных характеристик комплекса для нагрева вязкой нефти.

Решение поставленной задачи составляет основное содержание диссертационной работы, выполненной автором в Самарском государственном техническом университете.

Объект исследования – система косвенного индукционного нагрева движущейся нефти.

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 математический анализ, методы теории теплопроводности, преобразования Лапласа, теории электромагнитного поля, теории оптимального проектирования, теории автоматического управления, методы компьютерного моделирования. Для подтверждения достоверности и точности 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 котором 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 полезность работы. Прикладная значимость проведенных исследований определяется следующими результатами:

– Предложенная оригинальная модель трехфазного индукционного устройства позволяет сократить общую длину многосекционного нагревателя за счет совмещения функций нагрева и перемешивания.

– 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.

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

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на 17 Всероссийских и Международных конференциях.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 27 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, изложенных на 128 страницах машинописного текста; содержит 77 рисунков и 7 таблиц, список использованных источников, включающий 133 наименования и 1 приложение.

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.

На защиту выносятся следующие положения

– Математическая модель связанных электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов в системе «трехфазный индуктор – труба – вращающийся ротор – жидкость», учитывающая взаимное влияние термических и гидравлических процессов;

– Методика расчета параметров трехфазного индуктора с вращающимся магнитным полем для нагрева и перемешивания жидкости.

– Методика рационального проектирования и управления связанными процессами подогрева и перемешивания нефти для многосекционного индукционного комплекса, совмещающего в себе функции нагрева и перемешивания.

– Оптимальные алгоритмы пространственного распределения источников тепловыделения в многосекционном индукционном нагревателе при ограничении на мощность нагрева и температуру пристенного слоя жидкости.

Краткое содержание диссертации

Во введении дается краткое описание проблемы и обзор методов математического моделирования взаимосвязанных процессов, происходящих в индукционных системах, описывается актуальность темы, формулируются цель исследования и ряд задач, требующих решения, отмечаются новизна, практическая значимость и положения, выносимы на защиту.

В первом разделе проведен анализ существующих способов и средств термической обработки нефти при подготовке ее к транспортировке по нефтепродуктопроводам. Приведен обзор трудов математического моделирования индукционного нагрева, которые сочетают в себе задачи проектирования конструкций, различных режимов работы индукторов, а также систем управления для нагревателей. Показано, что из всех известных способов и средств наиболее эффективным и экологически чистым способом является электронагрев в различных модификациях. В то же время анализ существующих на сегодняшний день установок и способов электроподогрева нефти показал, что используемые методы и установки нагрева нефти не всегда удовлетворяют современным требованиям к экономической эффективности, габаритным характеристикам и скорости нагрева. В области совершенствования конструкции индукционных нагревателей, способов и систем управления остается ряд нерешенных вопросов, связанных с требованиями к снижению материала – и энергоемкости нагревательных установок.

Приведена постановка задачи исследования, заключающаяся в разработке комплекса математических моделей в системе «цилиндрический индукционный нагреватель – трехфазное индукционное устройство для перемешивания и нагрева жидкости», ориентированного на решение задачи оптимального проектирования многосекционного индукционного нагревателя минимальной длины. Совместное применение двух конструкций позволяет объединить достоинства каждого из приведенных устройств,

благодаря чему могут быть удовлетворены требования к минимизации длины индукционной нагревательной системы.

Во втором разделе разработан комплекс математических моделей с целью рационального формирования процессов нестационарной теплопроводности в системе разнородных по физической структуре тел, включающих в себя моделирование электромагнитных процессов в системе «цилиндрический индуктор – труба с внутренним ребрением», моделирование электромагнитных и электродинамических процессов в системе «трехфазный индуктор – металлическая труба – вращающийся ротор», моделирование процесса теплопередачи от тепловыделяющих поверхностей различной конфигурации к нагреваемой жидкости, учитывающее характер движения жидкости и зависимость реологических свойств жидкости от температуры.

В работе использован численный метод, как наиболее подходящей для решения сложных задач тепломассопереноса.

Алгоритм решения электромагнитной, тепловой и гидравлической задач реализован с использованием программного комплекса. Задача решалась с использованием программных средства Elcut и Comsol. Для представления результатов расчета в наглядной форме использованы встроенные средства графического отображения.

Полученный комплекс моделей дал возможность разработать методику расчета конструктивных и режимных параметров многосекционного комплекса для нагрева вязких нефтей, который обеспечивал бы заданные технологические и энергетические параметры для конкретного процесса в условиях заданных требований при необходимости придерживаться температурных распределений.

Сложная структура исследуемого объекта, неканоническая форма теплопередающей поверхности, неравномерная по сечению скорость потока жидкости исключают возможность использования для исследования

электромагнитных, электродинамических, гидравлических и тепловых полей аналитические методы расчета, поэтому в работе используется численный метод, как наиболее приспособленный для решения сложных задач тепломассопереноса. Использование метода конечных элементов позволяет с достаточной точностью определить распределение источников тепла в тепловыделяющих элементах нагревателя и температурные распределения в потоке жидкости.

Численный расчет тепловых и электромагнитных полей в сложной сопряженной системе разнородных тел, содержащей участки магнитной цепи, стальные тепловыделяющие элементы и диэлектрическую жидкость, производится с помощью программного комплекса Elcut– интегрированного диалогового комплекса программ, позволяющего решать двумерные задачи теплопроводности и электромагнетизма, описываемые дифференциальными уравнениями в частных производных для скалярной или одномерной векторной функции.

Для решения связанной электромагнитной, тепловой и гидравлической задач был предложен алгоритм, реализованный программным путем. Для вычисления этих задач были применены программные комплексы Comsol и Elcut. Для вывода результата в графическом представлении использовались встроенные инструменты визуализации.

Полученный комплекс моделей дал возможность разработать методику расчета конструктивных и режимных характеристик многосекционного нагревательного комплекса, который соответствовал необходимым требованиям для технологического процесса, а так же соответствовал необходимым энергетическим параметрам.

Третий раздел посвящен исследованию электротепловых процессов в трехфазном индукторе с вращающимся магнитным полем.

Индукционные устройства для перемешивания жидкостей, рассматриваемые 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. В работе исследована зависимость энергетических характеристик устройства от схемы соединения обмоток трехфазного индуктора.

В четвертом разделе на базе математической модели рассмотренной в разделе 2 разработаны методика и алгоритм расчета электромагнитных и тепловых полей в однофазном цилиндрическом индукционном нагревателе с внутренним оребрением тепловыделяющей трубы. Приведены результаты исследования электромагнитных и тепловых полей в тепловыделяющих элементах и потоке жидкости. Применение трубы с внутренним оребрением позволяет применять более высокую частоту (500÷2500Гц), увеличить удельную мощность нагрева, снизить массу нагревателя по сравнению с известным вариантом с внутренним вытеснителем, значительно повысить коэффициент мощности системы.

Для исследования влияния частоты на энергетические показатели нагревателя проведены расчеты параметров нагревателя на различных частотах 50, 500, 1000 и 2500Гц. В диссертации приложены результаты расчета характеристик индукционного нагревателя для этих частот.

В пятом разделе рассмотрены вопросы оптимизации длины индукционного нагревательного комплекса.

Протяженность нагревательного индукционного комплекса в общем случае зависит от удельной поверхностной мощности, выделяемым в стенке трубы индуктором, производительности, температурного режима и реологических свойств жидкости. При отсутствии технологических ограничений на температуру индукционный нагреватель позволяет создать высокий уровень удельной поверхностной мощности, что обеспечило бы

минимальную длину нагревательной системы. Однако, в реальной ситуации на максимальную температуру пограничного слоя жидкости наложены ограничения, обусловленные реологическими свойствами нефти. Из-за чего возникает необходимость установить значение максимальной температуры на определенной отметке, который явно ниже значений, предоставляемых физическими возможностями индукционных нагревателей. Сформулирована задача на минимум длины многосекционного нагревательного комплекса. Принимая во внимание ограниченную максимальную температуру пристенного слоя жидкости, а вследствие этого и ограниченную удельную поверхностную мощность, и нестабильный коэффициент теплообмена для трубы и жидкости, определены количество и мощность каждой секции. Принципиальным отличием процедуры поиска оптимального алгоритма распределения мощности по секциям для исследуемого нагревательного комплекса является наличие участков перемешивания на основе трехфазного индуктора, мощность которого распределяется по двум каналам: на создание вращающего момента и на нагрев жидкости. Расчет усложняется ещё одним обстоятельством: в зависимости от вязкости жидкости и производительности трубопровода распределение мощности между этими двумя составляющими изменяется, поэтому алгоритм расчета оптимальной длины дополняется подпрограммой расчета составляющих мощности трехфазного индуктора.

Метод определения наименьшей длины многосекционного индукционного комплекса и распределения мощности разработана с учетом установившегося значения длины секции на всех интервалах. Приведены результаты оптимизации длины нагревательного комплекса. Показано, что использование предложенной методики позволяет сократить длину нагревателя по сравнению с известными аналогами на 28÷32%.

В шестом разделе рассмотрены вопросы реализации алгоритмов и систем управления нагревательным комплексом.

Для реализации системы управления нагревательным комплексом как объектом с распределенными параметрами необходим пространственно – распределенный контроль его состояния. Для индукционного нагревателя вязкой жидкости при ламинарном характере течения необходимо несколько точек для оценки температуры по сечению. Их количество зависит от требуемой точности приближения расчетной средней температуры к её фактическому значению. Для определения минимального количества точек контроля температурного распределения по сечению потока нефти выполнена аппроксимация кривой температуры в виде кусочно – линейной функции, состоящей из отрезков прямых.

Предложена система регулирования однофазным индукционным нагревателем с обратной связью по средней температуре нефти. Получена передаточная функция индукционного нагревателя как объекта управления с распределенными параметрами.

Для поиска оптимальной частоты вращения использована следящая система, в которой задающий сигнал формируется с помощью интегрирующего устройства по информации о температурном распределении по сечению потока на входе в смеситель. Разработаны структурные схемы систем управления индукционным нагревательным комплексом. Предложена реализация автоматизированной системы управления индукционным нагревательным комплексом на базе микропроцессорной техники.

1. ПРОБЛЕМА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ НАГРЕВА ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

При решении задачи совершенствования индукционных систем нагрева вязкой нефти при транспортировке по магистральным трубопроводам возникает ряд проблем, связанных со сложностью построения необходимых для расчета достаточно точных математических моделей исследуемых процессов.

Индукционные системы, для тепловой обработки неэлектропроводных жидкостей, имеют ряд особенностей, отличающих их от нагревательных установок для нагрева металла под пластическую деформацию или термообработку. Принципиальное отличие состоит в том, что объектом нагрева является не металл, а неэлектропроводная жидкость; металлическая стенка трубы или резервуара, в которых находится нагреваемая жидкость, используется только в качестве источника тепла, которое возникает в ней под действием наведенных индуктором вихревых токов. Физические свойства нагреваемой жидкости изменяются в процессе нагрева, что отражается на процессе теплопередачи. Передача тепла от теплоисточника (стенки трубы или резервуара) осуществляется через поверхность контакта металлической стенки и жидкости.

Указанные отличия приводят к проблеме отсутствия существующих математических моделей, в которых учитывались бы взаимосвязанные электромагнитные, тепловые и гидравлические процессы, для нагрева жидкостей и необходимости их создания. Такие модели дали бы возможность создать методику расчета необходимых параметров для проектирования индукционных установок данного типа.

Параметры теплообмена между нагреваемой жидкостью и металлической стенкой, в которой происходит тепловыделение, зависят от конкретного технологического процесса, а также свойств участвующих в

процессе материалов. Это обстоятельство значительно усложняет исследование и анализ процессов теплообмена в многослойной структуре разных по физическим свойствам тел. Указанные процессы описываются в общем случае системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных и относятся к числу сложных, недостаточно исследованных процессов, обладающих специфическими особенностями. Исследование и разработка установок косвенного индукционного нагрева жидкостей с необходимыми по технологии параметрами и высокими экономическими показателями в условиях жестких энергетических и технологических ограничений, предъявляемым к режимным параметрам возможно только при наличии адекватных математических моделей методами численного моделирования.

Из-за сложности исследуемого процесса в работе принимаются некоторые допущения, которые не влияют на точность вычисления.

1.1 Способы и средства нагрева вязкой и высоковязкой нефти при транспортировке по трубопроводам

Вязкость нефтей определяется количеством парафина, смол, асфальтенов и серы, в их содержании. При понижении температуры способность парафина растворяться в углеводородной среде снижается. Это приводит к увеличению вязкости, образованию асфальтосмолистых веществ на стенках труб, и, как следствие, к сужению рабочего объема трубы [1–3].

Такие свойства жидкости являются большой проблемой при её транспортировке, и во избежание образования отложений на стенках труб используют подогрев. Для перекачки нефти наиболее эффективным и экологически чистым является электрический нагрев, который может быть реализован различными способами и устройствами [4–9].

Принцип прямого электроподогрева заключается в том, что участок трубы, который надо подогреть, подключается к источнику переменного

напряжения. При протекании электрического тока по трубе происходит равномерный нагрев участка трубы и передача тепла нагреваемой жидкости. Этот способ имеет ограниченное применение, так как для нагрева необходим источник с низким напряжением и большими токами, что затрудняет канализацию токов, требует применения кабелей и проводов большого сечения. Кроме того, такой способ сложно использовать технически, так как требуется изолировать нагреваемый участок трубы от грунта. Нагрев нефти с помощью электрических ТЭНов не получил широкого распространения из-за низкой эффективности и повышенной взрывоопасности.

Для нагрева потока вязкой жидкости применяются электрические нагревательные кабели и ленты. Они более экономичны, просты в эксплуатации, имеют широкий температурный диапазон. Однако, нагревательные резистивные системы обладают низким коэффициентом теплоотдачи и ограниченным диапазоном регулирования.

Широкое распространение для нагрева протяженных объектов в последние годы получили саморегулирующиеся кабели, потребляемая мощность которых изменяется автоматически в зависимости от температуры [10–13]. Саморегулирующиеся кабели выпускаются на различную фиксированную мощность. В том случае, если требуется регулирование мощности в широком диапазоне, необходимо применять несколько кабелей различной мощности, что значительно увеличивает стоимость нагревательной системы. Кроме того, саморегулирующиеся кабели предъявляют жесткие требования к качеству монтажа.

Общим недостатком всех резистивных нагревательных систем является малая контактная поверхность теплопередачи, что наряду с наличием тепловой изоляции между трубой и нагревательным кабелем приводит к большой инерционности системы и уменьшает теплоотдачу. Недостатком индукционно – резистивной системы является сложность монтажа и

демонтажа, необходимость устанавливать источники питания через определенное расстояние вдоль трубопровода.

Более эффективным способом нагрева нефти и вязких нефтепродуктов является нагрев с помощью индукционных нагревателей. Основное преимущество индукционного нагревателя заключается в бесконтактном и безынерционном способе передачи энергии от источника энергии к объекту нагрева и преобразования ее в тепловую. Подобные системы обладают высоким быстродействием и широким диапазоном регулирования.

1.2 Задача совершенствования конструкции и режимов работы индукционной системы технологического нагрева вязкой жидкости

К индукционным установкам для косвенного нагрева вязких и высоковязких нефтей предъявляются высокие требования по температурному режиму, обусловленные зависимостью свойств жидкости от температуры, наличием технологических и энергетических ограничений, необходимостью минимизации эксплуатационных затрат, экологичностью и безопасностью процесса.

Решение проблемы создания высокопроизводительной энергоэффективной установки для нагрева высоковязких жидкостей представляет собой сложную многосвязную задачу, включающую моделирование электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов в взаимосвязанной системе с движением, разработку на этой базе алгоритмов и методики расчета конструктивных и режимных параметров нагревателя. Сложность проблемы обусловлена взаимным влиянием электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов, нелинейной зависимостью свойств материалов нагревателя от температуры, а так же характером течения потока жидкости в полости нагревателя [15–21].

В большинстве исследований, посвященных математическому моделированию процессов индукционного нагрева, разработке оптимальных

режимов работы и созданию систем автоматизированного управления средней температурой в нагреваемом изделии, в качестве объекта управления рассматривается температурное поле в электропроводящем изделии, в котором выделяется тепло. К таким объектам относятся широко распространенные в машиностроении и металлургии индукционные установки для сквозного нагрева заготовок перед обработкой деформацией оборудования, установки для термообработки изделий, высокочастотные сварочные установки, индукционные плавильные печи и ряд других установок, используется принцип бесконтактного преобразования электроэнергии в тепловую энергию в системе «индуктор – металл»[22–26].

В исследуемой работе, в отличие от классических индукционных систем нагрева, объектом нагрева является неэлектропроводная жидкость, которая нагревается в индукционном устройстве за счет тепла, выделяющегося в трубе под действием индуцированных катушкой индуктора вихревых токов.

Исследуемые в работе установки для нагрева предназначены для подготовки вязких нефтепродуктов к перекачке по трубам, т.е. они должны обеспечить непрерывный нагрев потока нефти и быть встроены в технологическую трубопроводную сеть. В этом случае существенную роль в процессе теплообмена играет характер течения. Указанные обстоятельства обуславливают необходимость создания новых математических моделей процессов энергообмена.

В работах [27–30] рассматриваются вопросы исследования и разработки индукционных нагревательных систем для протяженных участков, нефтяных скважин, ограниченных участков труб сложной конфигурации. Разработаны компьютерные модели для исследования электромагнитных процессов при индукционном нагреве трубопровода в цилиндрическом пространстве с учетом сложной конфигурации

трубопровода. Предложены индукционные нагревательные модули повышенной частоты на базе транзисторных инверторов.

В работе [31] исследуются проблемы борьбы с парафинистыми отложениями на внутренней поверхности труб. Для очистки труб от парафинистых отложений предлагается скребок с индукционным нагревом. В работе [32] рассматривается способ и устройство для подогрева потока нефти в трубопроводе с помощью ферромагнитного нагревательного сердечника, расположенного внутри трубы из полимерного материала. Сердечник нагревается вихревыми токами, наведенными индуктором, расположенным на внешней поверхности трубы из полимерного материала. Приведенные результаты иллюстрируют решение частных задач, имеющих ограниченное применение.

В работе [33] по результатам исследований предложена установка для косвенного индукционного нагрева вязких жидкостей, представляющая собой систему из двух осесимметричных труб, между которыми прокачивается нагреваемая жидкость. Нагрев осуществляется за счет тепла, выделяющегося в трубах под действием вихревых токов, индуцированных электромагнитным полем индуктора.

Смоделирована и решена электромагнитная задача в системе состоящей из цилиндрической катушки, в полости которой находятся две разделенных диэлектрической жидкостью осесимметричные металлические трубы с различными физическими свойствами. На базе полученных результатов сформулирована задача идентификации, и предложена численная модель нестационарной теплопроводности в объекте, содержащем сопряженные тела с различными физическими характеристиками. Разработаны рекомендации по выбору оптимальной частоты, обеспечивающей равномерное выделение мощности в осесимметричных трубах нагревателя.

В работе [34] на базе детализированных математических моделей электромагнитных, гидравлических и тепловых процессов проведены расчеты, позволяющие получить неравномерное распределение скорости потока жидкости, сформулированы методы расчета и предложения по выбору конструктивных и режимных параметров многосекционных нагревателей. Разработаны предложения по определению оптимальной длины и мощности секций многосекционной индукционной системы в установках технологического нагрева вязких жидкостей.

В работе [35] рассматриваются проблемы, связанные с разработкой специализированного высокотемпературного трубчатого индукционного нагревателя для процессов переработки нефти на малогабаритных нефтеперерабатывающих установках. Вследствие температурных ограничений, обусловленных реологическими свойствами нефти, ламинарным характером течения вязкой жидкости в трубопроводе и низкой теплопроводностью нефти, длина высокопроизводительных индукционных нагревателей в указанных выше работах составляет 12÷15м. В связи с этим обстоятельством возникает задача разработки такой конструкции индукционной нагревательной системы, которая при той же производительности позволит снизить массогабаритные показатели.

Для обеспечения высокой производительности трубопроводной системы индукционные нагреватели должны иметь несколько автономных секций с развитой поверхностью теплообмена. Применение предложенной автором конструкции обеспечивает увеличение площади теплообмена при минимальном поперечном сечении потока жидкости. Однако и в этом случае, как показывает практика, общая длина нагревателя составляет значительную величину. Наличие лимита на максимальную температуру пристенного слоя жидкости в нагреваемом потоке не позволяет использовать все преимущества индукционного нагрева. Повысить интенсивность теплообмена и тем самым уменьшить габариты нагревательной системы при той же

производительности можно либо путем создания турбулентности потока за счет высоких скоростей, либо путем перемешивания жидкости в нагреваемом потоке. Однако, создать турбулентность потока нефти при практически реализуемых скоростях практически невозможно из-за её высокой вязкости. Решение указанной проблемы путем использования внешнего устройства для перемешивания усложняется наличием высокого давления в трубопроводе, которое предполагает полную герметизацию трубопроводной системы, и конструктивным исполнением этого устройства.

Одним из способов минимизации длины нагревательной системы при той же производительности трубопровода является повышение интенсивности теплообмена между стенкой тепловыделяющего цилиндра и потоком нагреваемой жидкости с помощью индукционного устройства, не нарушающего герметичность трубопроводной системы и обеспечивающего перемешивание жидкости в процессе её прохождения через нагреватель. Наличие таких смесителей позволяет значительно сократить длину нагревателя, что, в конечном итоге, позволит сократить суммарные затраты на нагреватель. В работе [36] рассматривался такой способ с применением смесителя на основе трехфазного индуктора с вращающимся ротором внутри трубы. Основным положительным эффектом предложенного способа является совмещение в одном устройстве операций перемешивания и подогрева за счет энергии трехфазного индуктора с вращающимся магнитным полем.

Предложенный автором индукционный нагревательный комплекс отличается от известных, вследствие чего возникает необходимость в более глубоком исследовании взаимосвязанных электромагнитных, электродинамических, тепловых и гидравлических процессов. В связи с этим возникает необходимость создания методики расчета параметров индукционного устройства, которое обеспечивает интенсивный теплообмен за счет перемешивания потока жидкости. При создании

высокопроизводительной системы, содержащей последовательно установленные секции нагревателей и устройств для перемешивания, необходимо решить комплекс задач:

- Моделирование связанных между собой электромагнитных, гидравлических и температурных процессов в системе «однофазный индуктор – оребренная труба – нефть»;

- Исследование электромагнитных и тепловых полей и вращающего момента в системе «трехфазный индуктор – труба – ротор – нефть»;

- Разработка алгоритма и методик расчета оптимальных конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной системы;

- Разработка унифицированного конструктива многосекционной индукционной нагревательной системы для нагрева вязкой жидкости;

- Аудит процесса индукционного нагрева потока жидкости с применением системы автоматического управления;

- Разработка алгоритма функционирования индукционного нагревательного комплекса с учетом специфики технологического процесса.

1.3 Обзор методов математического моделирования и оптимизации процессов индукционного нагрева

Косвенный индукционный нагрев неэлектропроводных материалов является одним из наиболее сложных электротермических процессов, а его применение предполагает глубокое изучение взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов, определяющих качество конечного состояния нагреваемого материала. При косвенном индукционном нагреве жидкостей кроме электромагнитных и тепловых процессов существенное влияние на процесс теплообмена оказывают гидравлические процессы. Процесс теплообмена происходит в многослойной среде между металлом и жидкостью. Ещё более сложными представляются

взаимосвязанные процессы, происходящие в индукционном устройстве для перемешивания и нагрева жидкостей, разработанном на базе трехфазного индуктора с вращающимся магнитным полем. Кроме взаимосвязанных электротепловых и гидравлических процессов в этом случае при моделировании необходимо учитывать электродинамические усилия, создающие вращающий момент ротора.

Вопросам теории и методам расчета электромагнитных и тепловых полей при индукционном нагреве металла посвящены многочисленные работы Г.И. Бабата, Н.Н. Родигина, А.М. Вайнберга, А.Е. Слухоцкого, В.С. Немкова, В.Б. Демидовича и других авторов [21–27]. Проблемы моделирования, расчета, проектирования и реализации индукционных установок для низкотемпературного нагрева ферромагнитных сталей на промышленной частоте рассмотрены в работах А.Б. Кувалдина и др. [4,6]. Даны описания и параметры систем индукционного нагрева ферромагнитных сталей, используемых в различных технологических процессах. Значительная часть работы уделена применению индукционных и индукционно – резистивных нагревательных установок для косвенного нагрева жидкостей и газов.

Однако, аналитические методы не позволяют решать задачи, связанные с учетом нелинейностей, обусловленных зависимостью электро – и теплофизических свойств нагреваемого металла от температуры, а так же не позволяют учесть все особенности процессов при нагреве тел сложной геометрической формы, при нагреве многослойных структур, состоящих из элементов с различными физическими свойствами. Различные аппроксимации, используемые при решении задач аналитическими методами, позволяют получить лишь приближенные результаты, что далеко не всегда соответствует требованиям технологического процесса. Высокие требования к точности моделирования электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве привели к необходимости применения

численных методов, таких, как метод конечных разностей и метод конечных элементов. Значительный вклад в разработке численных методов и применения их для исследования различных физических процессов внесли как зарубежные, так и отечественные ученые [37–44]. Созданы профессиональные пакеты программ, которые позволяют решать задачи моделирования в различных областях знания (Maxwell, Nastran, Ansys, Comsol, CedratFlux, Elcut). С их помощью решены многочисленные задачи проектирования систем индукционного нагрева для процессов деформации, термообработки, плавки металла и ряда других технологических процессов. помощью встроенных или внешних алгоритмов оптимизации. Используя численные методы расчета и поисковые процедуры оптимизации, решены многочисленные задачи оптимального проектирования и управления технологическими процессами.

При проектировании конструкций индукционных установок применяются различные методы, изложенные в работах Андреева Ю.Н., Брахмана Т.Р., Геминтерна В.В., Батищева Д.И. и др. [45–49]. Большинство применяемых методов направлено на применение аналитических моделей.

Новый метод оптимального управления индукционными установками рассматривается в работах Рапопорта Э.Я. [50–52], где с помощью разработанного альтернативного метода решен комплекс задач оптимизации стационарных и переходных режимов индукционных нагревателей по различным частным критериям оптимизации.

Методология оптимального проектирования индукционных нагревательных систем в комплексах «индукционная нагревательная система – деформирующее оборудование» приведена в работах Зимина Л.С. [53].

В работе рассмотрена задача проектирования систем индукционного нагрева под обработку на деформирующем оборудовании.

В работе Лившица М.Ю. [54] исследуется задача совместного проектирования и управления процессами технологической теплофизики.

В ряде работ, выполненных научной школой оптимизации и автоматического управления системами с распределенными параметрами Самарского государственного технического университета под руководством Рапопорта Э.Я., рассмотрены проблемы управления процессами индукционного нагрева металлических изделий по различным частным критериям качества. Разработаны рекомендации по выбору оптимальных конструктивных параметров и расчету алгоритмов управления. [55–59].

Задачи оптимизации стационарных режимов индукционного нагрева металла в технологической линии с деформирующим оборудованием рассмотрены в работах [60–64]. В зависимости от выбора критерия оптимальности и соотношения между предельными возможностями нагревательной установки и деформирующего оборудования технологической линии по производительности рассматриваются задачи оптимизации нагревательной установки на максимум быстродействия или минимум себестоимости затрат на нагрев.

В работе [64] для одномерной тепловой модели процесса нагрева в односекционном нагревателе предложены оптимальные программы изменения мощности, подводимой к нагревателю, которые доставляют минимум средне – квадратичному функционалу качества в переходных режимах при пуске нагревателя, при изменении производительности или смене номенклатуры изделий. В работе Плешивцевой Ю.Э. [65] рассматривается метод параметрической оптимизации алгоритмов управления индукционными системами в технологических линиях перед обработкой металла на деформирующем оборудовании. Рассмотрена задача комплексной оптимизации процессов нагрева и последующей обработки по комплексному критерию качества.

В последние годы наблюдается всё большее использование систем индукционного нагрева, которые применяются в таких производствах, как нефтедобывающий сектор, строительные отрасли и оборонная промышленность [66]. Это вызвано необходимостью модернизации существующих технологий, повышения качественных показателей технологического процесса, минимизации энергозатрат в рамках приоритетного энергоэффективного развития всех отраслей производства.

Существующие инженерные методики расчета индукционных нагревательных систем (ИНС) для нефтепроводов не учитывают всех особенностей нагрева вязких жидкостей с изменяющимися реологическими свойствами. Низкая теплопроводность вязких нефтей и ламинарное течение жидкости в трубопроводе при наличии ограничений на температуру нагрева приводит к значительным габаритам нагревательных устройств и снижению эффективности индукционного нагрева. В связи с этим проблема улучшения показателей эффективности и надежности индукционных систем в сферах, связанных с переработкой и перекачкой высоковязких нефтей, является комплексной и предполагает привлечение современных методов исследования [67–74]. Одним из целесообразных путей разрешения проблемы является применение специальных индукционных устройств, обеспечивающих увеличение теплопередачи от тепловыделяющих стенок трубопровода к жидкости за счет применения устройств перемешивания жидкости в процессе нагрева, что позволяет существенно минимизировать длину нагревательных систем в установках косвенного индукционного нагрева.

В работах [75–79] рассмотрены вопросы разработки и исследования индукционных вращателей для жидкометаллической загрузки плавильных агрегатов и миксеров на основе индукционных систем промышленной и низкой частот. Отмечается актуальность создания методики расчета электромагнитных устройств с вращающимся магнитным полем для

интенсификации технологических процессов. Отмечается, что использование электромагнитных вращателей позволяет создать новые установки и процессы с расширенными функциональными возможностями.

Решению задач применительно к расчетам различного рода перемешивающих установок посвящен значительный перечень работ. Рассматриваются вопросы моделирования и конструирования вертикальных перемешивающих устройств [80–86]. В настоящей работе задачу эффективного перемешивания ламинарного потока жидкости предлагается решать с помощью оригинальной конструкции, совмещающей в одном устройстве процессы перемешивания и нагрева жидкости [87]. Предлагаемое устройство состоит из трехфазного индуктора с вращающимся магнитным полем, полого ротора и диагональной крыльчатки, расположенной на одной оси с ротором.

1.4 Постановка задачи исследования

Проектирование многосекционных индукционных систем для подогрева нефти ставит перед собой решение двух основных задач: выбор рациональной конструкции индукционного комплекса и вычисление характеристик системы и режимов её работы. В первую очередь решается проблема выбора оптимальной конструкции индукционного комплекса. После утверждения конструкции системы, во вторую очередь решается задача распространения мощности нагрева по длине многосекционного индукционного комплекса, обеспечивающего заданный температурный режим. Целью этого этапа является определение такого распределения мощности по секциям комплекса, которое обеспечивает требуемую температуру нефти на выходе из установки в стационарном режиме работы с заданной точностью при оптимальной длине многосекционного нагревателя с учетом ограничений на мощность и температурный режим нагрева.

При проектировании технологической установки, включающей в себя индукционный нагрев как важную составляющую часть технологического процесса транспортировки нефти по трубопроводам, должен быть выполнен расчет и выбор из существующего многообразия форм индукционных нагревателей конструктивного решения, наиболее рационально удовлетворяющего требованиям технологии и эргономики; проведено моделирование задач взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов в многосекционном индукционном нагревателе; выполнена проверка процесса нагрева с позиций электромагнитной совместимости и энергоэффективности нагревательной системы; определены ограничения, определенные технологическим процессом.

В работах [33, 34, 49, 66] рассматриваются вопросы разработки математических моделей процессов косвенного индукционного нагрева вязких жидкостей, разработка на их основе методик расчета конструктивных и режимных параметров индукционных нагревательных установок, предназначенных для нагрева вязких жидкостей. Рассматриваются вопросы оптимального проектирования стационарных режимов нагрева по частным критериям оптимальности. В работе [49] предложен метод интегрированного проектирования индукционных нагревателей периодического и методического действия для косвенного индукционного нагрева неэлектропроводных тел различного технологического назначения.

Для повышения производительности предложена конструкция, которая предусматривала цикл перемешивания жидкости в промежутках между нагревательными секциями [34]. Наличие таких перемешивателей приводит к конструктивному усложнению систем, однако, это решение позволяет оптимизировать длину нагревателя что, в конечном итоге, позволит оптимизировать технико-экономические параметры. В работе не приводится конструкция устройства для перемешивания жидкости, рассматривается лишь гипотетический перемешиватель без конкретной реализации. Однако,

как показано в настоящей работе, конструкция перемешивателя и его характеристики могут оказать существенное влияние на энергетические характеристики всей нагревательной системы.

В настоящей работе проблема уменьшения общей длины многосекционного нагревателя при той же производительности трубопровода решена за счет применения комбинации секций цилиндрических индукционных нагревателей с внутренним оребрением тепловыделяющей трубы и специального трехфазного индукционного устройства для перемешивания и нагрева жидкости. Трехфазное индукционное устройство с вращающимся магнитным полем выполняет одновременно две функции – перемешивание жидкости и её подогрев.

Эскиз цилиндрического индукционного нагревателя, состоящего из цилиндрического индуктора и ферромагнитной трубы с внутренним оребрением, представлен на рис. 1.1.

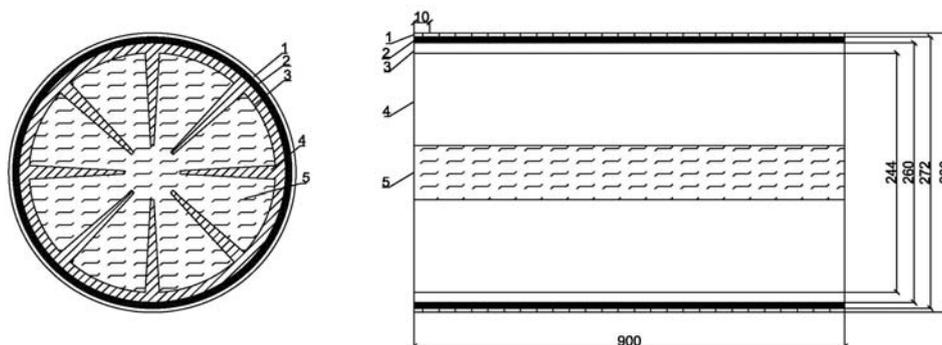


Рис 1.1 Конструкция нагревателя в разрезе

1 –Витки индуктора; 2 –Изоляция; 3 –Труба; 4 –ребра; 5 –Нефть;

Конструкция индукционного устройства для перемешивания и нагрева жидкости представляет собой систему, состоящую из трехфазного цилиндрического индуктора с вращающимся магнитным полем, внутри которого находится полый ферромагнитный цилиндр – ротор. На одной оси с ротором расположена диагональная крыльчатка, конструктивно представляющая собой комбинацию роторов осевого и центробежного типов

[81–86]. Ротор установлен в подшипниках, что обеспечивает возможность вращения ротора и перемешивания жидкости. При этом часть энергии идет на нагрев, а часть – на вращение ротора и перемешивание жидкости.

Эскиз индукционного устройства для перемешивания и нагрева представлен на рис. 1.2.

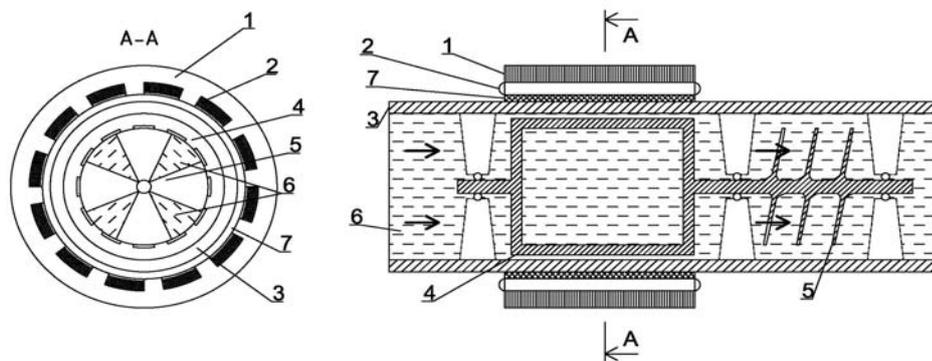


Рисунок 1.2. Конструкция трехфазной индукционной установки:
 1 – магнитопровод индуктора, 2 – пазы обмотки индуктора, 3 – внешняя труба,
 4 – ротор, 5 – крыльчатка, 6 – поток нагреваемой жидкости, 7 – изоляция

Такой комбинированный способ преобразования электрической энергии в тепловую и механическую, совмещающий нагрев и перемешивание в одном устройстве, позволяет при использовании её в комплексе с индукционными нагревательными секциями значительно ускорить процесс теплообмена и сократить общую длину многосекционного нагревателя. Кроме того, в установках высокой производительности предлагаемая конструкция позволит обеспечить симметричную нагрузку на трехфазную сеть, повысить коэффициент мощности системы и коэффициент полезного действия. Соотношение между мощностью нагрева и мощностью, идущей на вращение ротора и перемешивание жидкости, зависит от реологических свойств транспортируемой жидкости, частоты тока источника питания, электрофизических свойств материала и конструктивных параметров системы. Для решения комплекса задач, посвященных совершенствованию многосекционного индукционного нагревателя для термообработки вязких нефтей при транспортировке по трубопроводам путем разработки

специфического трехфазного индуктора с бегущим магнитным полем, используется метод конечных элементов (МКЭ). На сегодняшний день современные вычислительные средства и программные комплексы позволяют при проектировании учитывать большое количество параметров, что позволяет разработать оптимальную конструкцию многосекционной индукционной установки, удовлетворяющую технологическим и экономическим требованиям. Решение задачи повышения энергоэффективности многосекционного индукционного нагревателя для нагрева вязких жидкостей при их транспортировке путем разработки методики расчета многосекционного индукционного нагревателя на основе уточненных численных математических моделей электромагнитных и тепловых полей и является главной темой исследования в диссертации.

Сложность моделирования электротепловых процессов обусловлена неоднородной составной структурой системы «индуктор – металл – жидкость» и нелинейными зависимостями параметров процесса от температуры в процессе нагрева.

Моделирование процесса нагрева сводится к решению трех взаимосвязанных задач – электромагнитной, тепловой и гидравлической.

В отличие от классических индукционных систем для высокотемпературного нагрева металла под пластическую деформацию в исследуемой системе температурный режим ограничен и заключен в пределах 20÷150 град. Это обстоятельство позволяет исключить в расчетах температурную зависимость магнитной проницаемости и учитывать только её зависимость от напряженности магнитного поля.

Следует что, при создании энергоэффективных индукционных систем для нагрева нефти необходимо решить несколько научных задач:

– Разработка численных математических моделей процессов нагрева и перемешивания жидкости в трехфазном индукционном нагревателе с бегущим магнитным полем в системе сопряженных разнородных по своим

физическим свойствам тел с учетом нелинейной зависимости реологических свойств нагреваемой жидкости от температуры.

– Разработка уточненных математических моделей процессов нагрева жидкости в системе «цилиндрический индуктор– труба с внутренним оребрением – жидкость» и исследование на основе полученных моделей электромагнитных и тепловых полей.

– Разработка на основе уточненных математических моделей вычислительных алгоритмов для реализации метода расчета электромагнитных и тепловых полей в многосекционной индукционной установке.

– Разработка математической модели комплекса «цилиндрический индукционный нагреватель –трехфазное индукционное устройство для перемешивания и нагрева жидкости

– Разработка методики расчета и рекомендаций по выбору оптимальных конструктивных и режимных параметров многосекционного индукционного нагревательного комплекса, включающего цилиндрические индукционные нагревательные секции и трехфазные индукционные устройства для перемешивания и нагрева жидкости.

Выводы

– Классические установки индукционного нагрева используются в большом количестве для нагрева металла под термообработку или пластическую деформацию. Индукционный нагрев диэлектрических жидкостей значительно отличается характером энергообмена в разнородной среде, которая состоит, в общем случае, из индуктора, тепловыделяющих элементов и диэлектрической жидкости. В таком случае появляется потребность в более углубленном исследовании процессов нестационарного энергообмена в системе “индуктор – тепловыделяющие элементы –

жидкость” и установлении зависимости внутренних связей между элементами новой исследуемой системы.

– Современные требования к надежности систем трубопроводного транспорта, энергоемкости, снижению уровня экологических загрязнений подталкивают к разработке новых технологий нагрева, усовершенствования конструкции и режимов работы индукционных систем. Повысить эффективность индукционных нагревателей для жидкостей и удовлетворить все технологические требования можно за счет разработки специальных устройств, обеспечивающих интенсификацию теплообмена между источниками тепловыделения и нагреваемой жидкостью.

– Изученные труды по косвенному индукционному нагреву вязких неэлектропроводных жидкостей посвящены решению узконаправленных задач и не охватывают всего многообразия конструкций индукционных нагревательных систем. В настоящей работе проблема повышения эффективности многосекционной индукционной нагревательной системы решена за счет повышения интенсивности теплообмена путем разработки оригинального встраиваемого в индукционную многосекционную систему трехфазного индукционного смесителя.

– Для решения приведенных в работе проблем требуется исследование процессов энергообмена в системе «индуктор– труба –поток жидкости».

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОСВЕННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Исследуемый объект представляет собой многосекционный индукционный нагреватель проточного типа, состоящий из последовательно установленных автономных секций, охваченных цилиндрическим индуктором, и трехфазных индукционных устройств для перемешивания нагреваемой жидкости, установленных в промежутке между секциями.

Математическая модель процесса нестационарной теплопроводности в исследуемой системе может быть получена только при наличии всей информации о процессе подогрева с учётом разнородности нагреваемых материалов, конструкции системы и взаимных перемещений. Полученная модель позволит разработать методику расчета геометрических и режимных параметров нагревательной системы, обеспечивающей достижение определенных технологических и энергетических параметров технологического процесса в условиях определенных требований к точности воспроизведения температур при наличии ограничений.

Математическая модель процесса индукционного нагрева описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье соответственно для электромагнитного и теплового полей и уравнением неразрывности Навье – Стокса [82 –84]:

$$\operatorname{rot}\{\bar{H}\} = \{J_s\} + \{J_e\}; \operatorname{div}\{\bar{B}\} = 0; \quad (2.1)$$

$$\gamma c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \{L\}^T \{q\} = \ddot{q} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + v(\nabla v) = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} P + \frac{1}{\rho} \nabla(\mu_e \nabla v) \quad (2.3)$$

Здесь $\{\bar{H}\}, \{\bar{B}\}$ – векторы напряженности магнитного поля и магнитной индукции; $\{J_s\}$ – вектор плотности первичного тока; $\{J_e\}$ – вектор плотности индуцированного тока; T – температура, t – время; γ – удельная

теплопроводность; $c(T)$ – удельная теплоемкость; γ – плотность, μ_e – эффективная вязкость, P – давление, u – вектор скорости.

Граничные условия для электромагнитной задачи имеют вид

$$A = 0;$$

Для тепловой задачи

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_c);$$

Для гидравлической задачи

$$n \cdot u = 0.$$

Практически применяются граничные условия 1 и 3 рода из-за того, что в электромагнитной и гидравлической задачах кроме бесконечно удаленной границы и стенки нет других границ; в тепловой задаче из-за низких температур другие виды теплообмена не имеют практического значения.

Главной особенностью технологического нагрева вязких жидкостей является связь между распределениями температуры жидкости и скорости по сечению потока. В связи с этим представляет интерес расчёт скорости потока для разных режимов с целью определения характера распределения скорости потока по радиальной координате и учета его влияния на температурное распределение.

2.1 Моделирование электромагнитных процессов

Расчет значений для электромагнитного поля выполняется с учетом следующих допущений:

– Поле условно принимается квазистационарным. Это значит, что отсутствует запаздывания в электромагнитной волне в диэлектрике. Такое допущение позволяет пренебречь токами смещения по сравнению с токами в проводниках.

– Пренебрегаются потери на гистерезис при нагреве ферромагнитных тел в силу того, что они незначительны в сравнении с потерями от вихревых токов.

Решение краевой задачи расчета магнитного поля в изотропной среде эквивалентно минимизации энергетического функционала:

$$F = \int_V \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial z} \right] dx dy dz + j\omega\sigma[\bar{A}]^2 dx dy dz + \int_V \{J\}\{\bar{A}\} dx dy dz$$

На основе функционала формируются выражения для матриц коэффициентов и переменных. Система алгебраических уравнений решается итерационным методом и позволяет определить значения векторного магнитного потенциала для всех узлов, содержащихся в ансамбле. После этого производится расчет токов и мощностей, которые представляют собой распределения по пространственным координатам. С помощью интегрирования по объему выбранных областей вычисляются интегральные значения. Кроме этого, рассчитываются также электродинамические усилия, действующие на проводящие тела индукционной системы.

Алгоритм программы представлен на рис 2.1



Рис. 2.1. Алгоритм программы расчета электромагнитной задачи.

2.2. Математическая модель тепловых процессов в цилиндрической системе «индуктор–труба–жидкость»

Исследование температурных полей производится на численной модели, описывающей процессы теплопередачи в системе сопряженных тел с различными физическими свойствами. Так как исследуется процесс нагрева жидкости в нагревателе непрерывного действия, необходимо учитывать характер течения жидкости. Вследствие высокой вязкости нефти, движение остается ламинарным.

Температурное распределение по сечению потока жидкости рассчитывается с учетом результатов гидравлического расчета. Расчет

температурного распределения производится на связанной модели, включающей три вида моделей:

– Модель электромагнитных процессов в системе «индуктор – тепловыделяющая труба». Нагрев трубы в зависимости от типа индукционной системы осуществляется либо в продольном (цилиндрический индуктор), либо в поперечном (трехфазный индуктор–перемешиватель) магнитном поле;

– Модель Навье –Стокса для расчета зависимости распределения скорости потока по сечению от вязкости;

– Модель нестационарной теплопроводности в системе «теповыделяющая труба– поток жидкости».

Так как характеристики жидкости существенно зависят от температуры, система уравнений дополняется известными функциями вязкости, плотности, удельной теплоемкости, теплопроводности от температуры.

Процесс тепломассопереноса описывается уравнением[132]:

$$\gamma c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \{L\}^T \{q\} = \dot{q},$$

Где γ – плотность; c – удельная теплоёмкость; T – температура;

$\{L\} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right\}^T$ – векторный оператор; $\{q\}$ – вектор теплового потока; \dot{q} –

скорость образования тепла в конечном объёме.

Плотность нефти линейно зависит от температуры:

$$\gamma_4 = \gamma_4^{20} - \xi(T - 20)$$

где γ_4 – относительная плотность; γ_4^{20} – относительная плотность при $T=20C^\circ$; ξ – температурная поправка.

В свою очередь, температурная поправка ξ зависит от плотности:

$$\xi = 18,25 \times 10^{-4} - 13,15 \times 10^{-4} \gamma_4$$

С учетом этого соотношения имеем для определения относительной плотности γ_4 нефти:

$$\gamma_4 = \frac{\gamma_4^{20} + 18,25 \times 10^{-4}(20 - T)}{T + 13,15 \times 10^{-4}(20 - T)}$$

Плотность стали трубопроводов в рассматриваемом диапазоне температур не изменяется и может быть принята постоянной.

Увеличение теплоемкости для нефти и нефтепродуктов в диапазоне температур определяется по формуле Крeго [91]:

где γ_{15} – плотность нефти при $T=150\text{C}$,

Для ориентировочных расчетов диапазон изменения удельной теплоемкости нефти может быть принят в пределах $1,65 - 2,5 \text{ кДж/кг} \cdot \text{°C}$.

Для расчетов температурного распределения в потоке нефти зависимость коэффициента теплопроводности от температуры определяется по формуле Крeго – Смита [91]:

$$\lambda = \frac{0,137}{\gamma_{15}} (1 - 0,54 \times 10^{-3}T)$$

В области $2000 < Re_f < 10^4$ коэффициент теплообмена между стенкой трубы и жидкостью изменяется в небольших пределах и при проведении численных расчетов температурных полей принимается постоянным по длине.

2.3. Математическая модель гидравлических процессов

Главной отличительной чертой процесса нагрева при транспортировке нефти остается связь значения вязкости со значением температуры. Исследование гидравлических характеристик потока нефти основывается на уравнениях неразрывности Навье – Стокса [80–82].

Уравнение неразрывности для случая вязкой несжимаемой жидкости вытекает из закона сохранения массы [93]:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = \text{div}(\gamma v) \quad (2.4)$$

где v – вектор скорости.

Выражение (2.4) преобразует уравнения движения в уравнения Навье – Стокса:

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

μ_e – эффективная вязкость.

Для аналитического описания вязкостно – температурной зависимости используется эмпирическая формула:

$$v = \frac{420}{1 + 0,005 \cdot T + 0,0055 \cdot T^3} + 0,03$$

В результате основываясь на приведенных взаимосвязях, задача исследования гидравлических процессов решается с помощью метода конечных элементов, в которой определяется распределение скоростей.

2.4. Математическая модель электротепловых процессов в трехфазном индукторе

В индукционной системе, состоящей из цилиндрического магнитопровода, в пазах которого расположена трехфазная обмотка, трубы из немагнитной стали и встроенного в полость трубы ротора (рис 2.2) осуществляется сложный взаимосвязанный процесс преобразования электрической энергии в тепловую и механическую энергию. В отличие от соленоидальных индукторов, в которых нагрев осуществляется в продольном магнитном поле и вся преобразованная энергия идет на нагрев, в трехфазном индукторе электрическая энергия превращается в электромагнитную энергию вращающегося поля, причем, одна часть энергии преобразуется в тепловую энергию, а другая часть – в механическую энергию вращения ротора.

Исходную математическую модель процессов индукционного нагрева в поперечном магнитном поле осесимметричной системы сопряженных тел можно представить системой уравнений вида

$$\frac{\partial T_1(r, x, \theta, t)}{\partial t} = a_1(T_1) \left[\frac{\partial^2 T_1(r, x, \theta, t)}{\partial r_2^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, x, \theta, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1(r, x, \theta, t)}{\partial x^2} \right] + a_1(T_1) \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_1(r, x, \theta, t)}{\partial \theta^2} + \frac{1}{c(T_1)\gamma} W_1(r, x, \theta, t), r \in [R_1, R_2] \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial t} = a_2(T_2) \left[\frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial r} + V(r) \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial x} \right], r \in [R_2, R_3] \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial T_3(r, x, \theta, t)}{\partial t} = a_3(T_3) \left[\frac{\partial^2 T_3(r, x, \theta, t)}{\partial r_2^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3(r, x, \theta, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3(r, x, \theta, t)}{\partial x^2} + \right] \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial T_4(r, x, t)}{\partial t} = a_2(T_2) \left[\frac{\partial^2 T_4(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4(r, x, t)}{\partial r} + V(r) \frac{\partial T_4(r, x, t)}{\partial x} \right], r \in [0, R_4] \quad (2.8)$$

соответственно для стенки трубы (2.5), для жидкости между стенкой трубы и ротором, (2.6), для стенки ротора (2.7), для жидкости в полости ротора (2.8).

Теплообмен между тепловыделяющими поверхностями и жидкостью описываются граничными условиями четвертого рода.

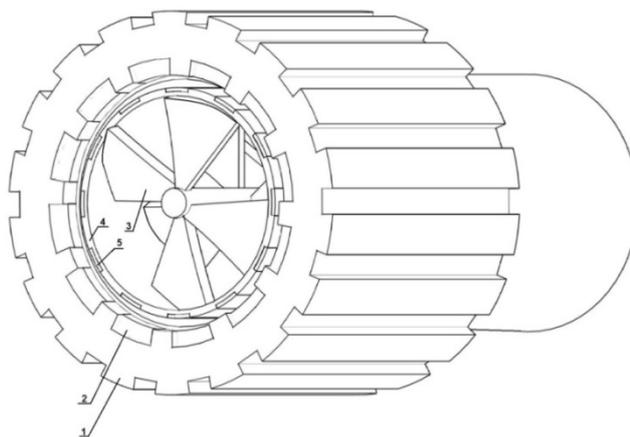


Рисунок 2.2 — Эскиз индуктора –смесителя

1 –Статор; 2 – Паз статора; 3 –Смеситель; 4 –Ротор; 5 – Беличья клетка.

Здесь r, x, θ – радиальная, аксиальная и угловая координаты, t – время процесса, $T_1(r, x, \theta, t), T_2(r, x, t), T_3(r, x, \theta, t), T_4(r, x, t)$ –соответственно температурное распределение в стенке трубы, в жидкости между трубой и ротором, в стенке ротора, температурное распределение в жидкости в полости ротора. Как показали исследования температурных полей, температурная зависимость от угла θ наблюдается только в поверхностных слоях стенки трубы и ротора. Температура стенок, контактирующих с жидкостью, представляет собой эквипотенциальную поверхность, не зависящую от угловой координаты, поэтому угловая координата в уравнениях (2.17), (2.19) отсутствует; $a_1(T_1), a_3(T_3)$ – коэффициенты температуропроводности материалов трубы и ротора соответственно, $a_2(T_2), a_4(T_4)$ – коэффициенты теплопроводности жидкости. R_1, R_2, R_3, R_4 – соответствующие радиусы внешней и внутренней поверхностей трубы, внешней и внутренней поверхности ротора.

$W(r, x, \theta, t) = F(r) \cdot Q(\theta) \cdot G(x) \cdot U(t)$ – источники внутреннего тепловыделения в нагреваемой системе, $F(r)$ –распределение источников тепла по радиальной координате, $Q(\theta, t)$ –распределение источников тепла в трубе по окружности, $G(x)$ – распределение источников тепла по длине, $U(t)$ – зависимость мощности источников тепла от времени.

Для решения задачи теплообмена в трехфазной индукционной системе использована схема, представленная на рис. 2.3.

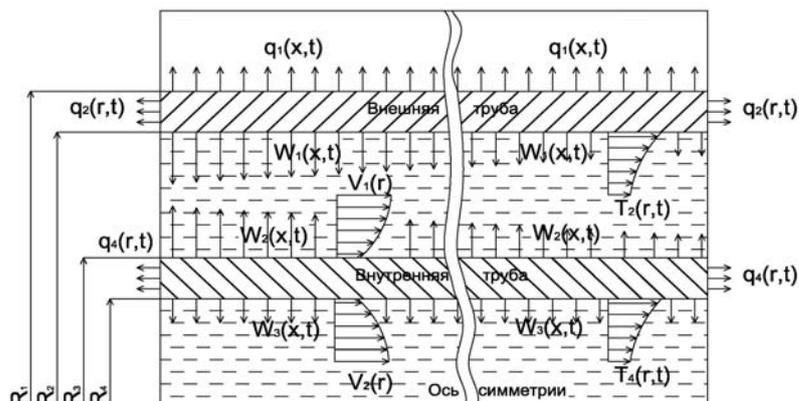


Рис. 2.3. Схема теплообмена

Определение температур в потоке жидкости сводится к решению уравнения теплопроводности Фурье с найденными из решения электромагнитной задачи источниками тепла.

Решения задачи взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов осуществляется с использованием программного обеспечения. В программе модулирования Elcut, с выводом результатов в графические изображения.

Алгоритм решения для электротепловых процессов в модели при известных исходных данных заключается в следующем:

- На основании информации о температурном распределении, вычисляем значение удельного сопротивления и магнитной проницаемости для каждого элемента модели;
- Проводится расчет характеристик электромагнитного поля;
- Проводится расчет скоростей потока жидкости;
- В модели применяются различные физические процессы, которые как часто бывает, взаимосвязаны, что заставляет задавать их взаимное влияние в ходе моделирования системы; полученные распределения скорости и температурные распределения, которые найдены в предыдущих

этапах, служат исходными данными для этой модели. После этого задается взаимосвязь гидравлических и тепловых процессов.

– Решается задача с использованием температурного распределения в разнородной системе тел с учетом тепловых потерь, уносимых потоком жидкости, движущейся с заданной скоростью, и одинаковой начальной температурой на входе;

– Если полученные результаты не соответствуют требуемой задаче, то происходит возврат к п.1.

Выводы

– Сформулирована задача моделирования и разработан численная модель процесса индукционного нагрева в системе «цилиндрический индуктор – труба – поток жидкости». Разработанные электромагнитная и тепловая модели учитывают сложный профиль внутренней поверхности трубы с жидкостью и взаимное влияние тепловых и электромагнитных полей;

– Разработана численная модель электромагнитных и тепловых процессов в системе «трехфазный индуктор – труба – полый ротор – поток жидкости»;

– На базе программных комплексов с применением метода конечных элементов предложен алгоритм расчета, включающий электромагнитные, гидравлические и тепловые процессы, позволяющий комплексно решить задачу тепломассопереноса при подогреве потока жидкости в индукционной системе.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОМ ИНДУКТОРЕ С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Предложенные конструктивные решения, рассмотренные в исследованиях [16-18, 33-35, 89] позволяют выполнить основную задачу – обеспечить экологически чистый и хорошо управляемый процесс нагрева нефти при перекачке. Однако, вследствие низкой теплопроводности нефти нагреватели имеют большую длину. Указанное обстоятельство снижает эффективность использования индукционных нагревателей для нагрева неэлектропроводных жидкостей с низкой теплопроводностью. Одним из способов сокращения длины нагревательной системы является использование предложенного в настоящей работе устройства, обеспечивающего одновременное перемешивание и нагрев жидкости в процессе её прохождения через многосекционный нагреватель.

3.1. Конструкция трехфазного индуктора для перемешивания и нагрева

Индукционные устройства для перемешивания жидкостей, рассмотренные в настоящей работе, имеют ряд особенностей, отличающих их с точки зрения моделирования электротепловых процессов от известных [91]. Основное отличие заключается в преобразовании подводимой к индуктору электрической энергии в механическую энергию для перемешивания и в тепловую энергию для нагрева жидкости. Процесс теплопередачи осуществляется между элементами устройства с различными физическими свойствами. В качестве источников тепла в исследуемом устройстве рассматриваются, труба из нержавеющей стали, расположенная в расточке трехфазного индуктора, и полый ротор, в которых тепло возникает под действием индуцированных вихревых токов. Между трубой и ротором, а также в полости ротора, прокачивается нагреваемая жидкость. Передача тепла в жидкость от теплоисточников осуществляется через поверхности

контакта элементов устройства (трубы и ротора) и нагреваемой жидкости. Сценарий теплообмена между нагреваемой жидкостью и устройством подогрева чаще всего зависят от индивидуальности конкретного технологического процесса [93,95], свойств нагреваемого материала – его теплоемкости, теплопроводности, разности температур, характера течения жидкой среды и пр.

На рис. 3.1 представлен эскиз индукционного смесителя. На одном валу с ротором крепится смеситель, обеспечивающий интенсивное перемешивание жидкости [81–86].

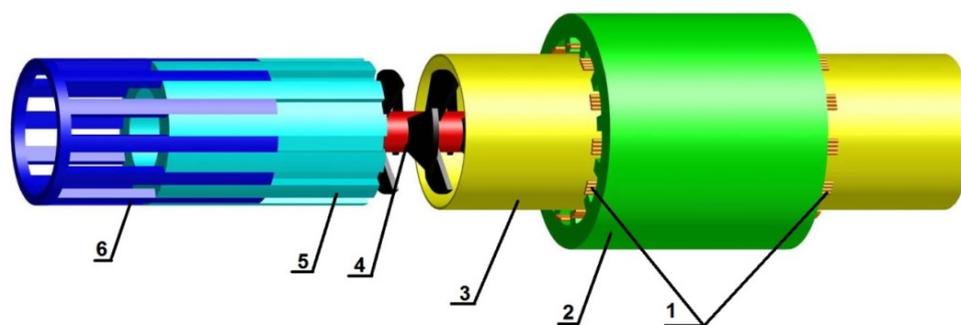


Рис. 3.1. Эскиз устройства для перемешивания.

1 – Обмотка. 2 – магнитопровод. 3 – Труба из нержавеющей стали. 4 – Смеситель. 5 – Ротор. 6 – Беличья клетка

3.2. Моделирование электротепловых процессов

Для расчета конструктивных и режимных параметров нагревательной системы с учетом специфики предлагаемого устройства используется программный комплекс Elcut 5.9. Так как электромагнитные процессы можно считать практически безинерционными по сравнению с тепловыми процессами, решение электромагнитной и тепловой задач выполняется отдельно, что значительно упрощает и ускоряет процедуру расчета.

Математическая модель процесса индукционного нагрева в трехфазном индукторе с вращающимся магнитным полем и полым ротором с нагреваемой жидкостью представлена в разделе 2 (2.5-2.8)

На рис.3.2 показана схема трехфазного индуктора с вращающимся магнитным полем. Обще принятые допущения позволяют упростить решение электромагнитной задачи.

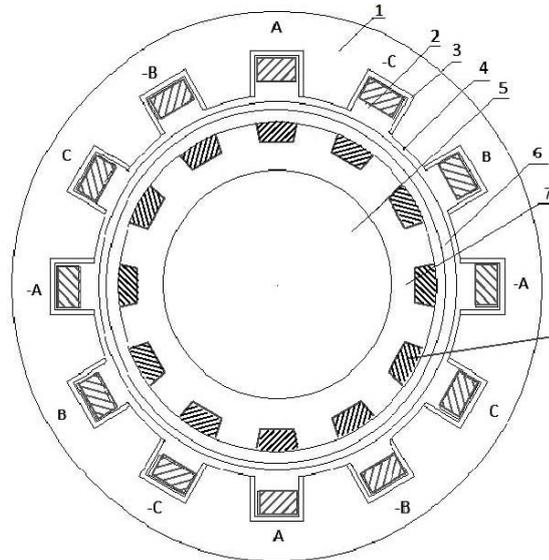


Рис. 3.2. Трехфазный индуктор с магнитопроводом.

1 – магнитопровод; 2 – провод обмотки; 3 – изоляция витка; 4 – тепловая изоляция; 5 – нагреваемая жидкость; 6 – труба; 7 – полый ротор; 8 – беличья клетка.

Решение краевой задачи расчета магнитного поля в изотропной среде эквивалентно минимизации энергетического функционала:

$$F = \int_V \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial z} \right] dx dy dz +$$

$$+ \int_V J \omega \sigma |\bar{A}|^2 dx dy dz \int_V \{J\} \{\bar{A}\} dx dy dz$$

Здесь \bar{A} – векторный магнитный потенциал.

Для наглядности расчетов, они представляются в виде графического распределения заданной величины. Благодаря таким удобным средствам можно получить наглядное распределение теплового поля. В таблице 3.1 приводятся исходные данные.

Наименование	Условное обознач.	Величина	Размерность	Примеч.
Конструктивные параметры.				
Длина секции		0,5	м	
Производительность		90	Тонна/сутки	
Диаметр внешней трубы из нержавеющей стали		0,260	м	
Толщина изоляции		0,003	м	
Толщина стенки трубы из нержавеющей стали		0,004	м	
Зазор между трубой и ротором		0,003	м	
Внешний диаметр ротора		0,246	м	
Размер паза ротора	$A \times B$	18 x 12	мм	
Кол –во пазов ротора	n_1	12	шт.	
Внутренний диаметр ротора		0,186	м	
Размер паза статора	$A \times B$	20x20	мм	
Кол –во пазов статора	n_2	12	шт.	
Внешний диаметр статора		0,398	м	
Внутренний диаметр статора		0,266	м	
В электромагнитной задаче				
Размеры витка статора в численной модели	$A \times B$	35x35	мм	
Материал витков		Медь		
Материал статора		сталь		
Материал ротора		Сталь		
Материал беличьей клетки		алюминий		
Материал трубы		нерж.сталь		
Материал нагреваемой жидкости		нефть		
Частота	f	50	Гц	

Геометрическая модель для решения электромагнитной и тепловой задач приведена на рис. 3.3

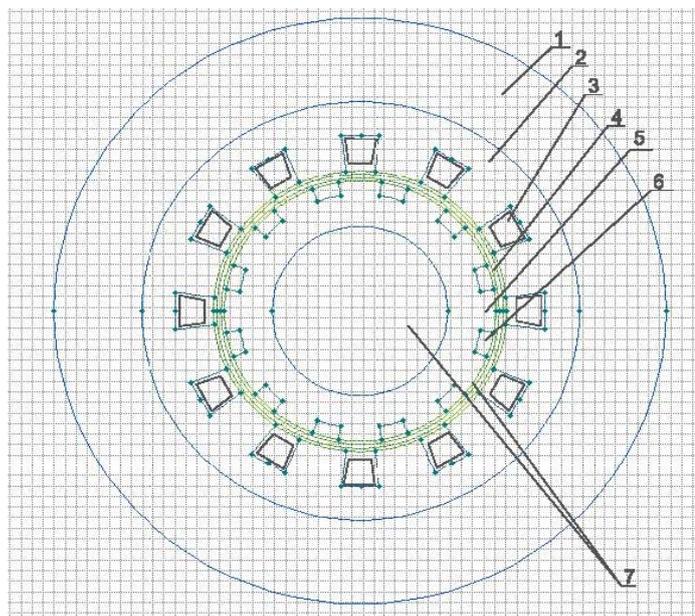


Рис. 3.3. Геометрическая модель для решения электромагнитной задачи

1 – воздушное пространства; 2 – магнитопровод; 3 – провод обмотки; 4 – труба; 5 – ротор; 6 – беличья клетка; 7 – жидкость.

Решение задачи производится в двухмерной постановке, что значительно сокращает расход ресурсов, требуемых для решения. Для решения электромагнитной задачи для модели, в которой содержится $N=28453$ элементов, требуется персональный компьютер с 4 гигабайтами оперативной памяти.

3.3. Исследование влияния числа пар полюсов индукторана энергетические характеристики устройства

При исследовании процессов преобразования электрической энергии индуктора в тепловую и механическую энергию смесителя необходимо учитывать зависимость энергетических характеристик индуктора – смесителя от числа пар полюсов статора, или от частоты вращения поля статора. Изменение числа пар полюсов статора осуществляется в данной конструкции изменением схемы соединения обмоток статора. В работе рассмотрено два варианта схемы соединения обмоток статора, приведенные ниже. На рис.3.3

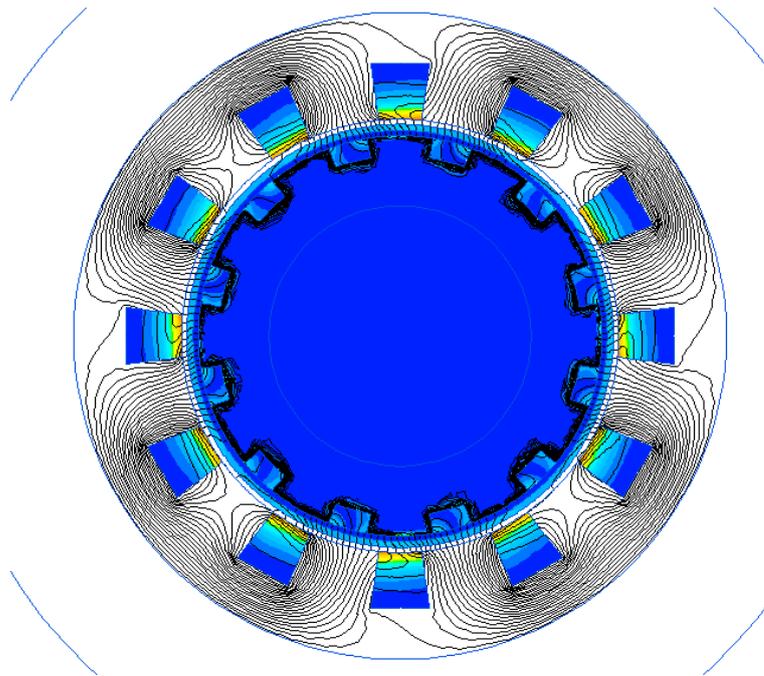


Рис. 3.5. Распределение плотности тока с линиями индукции, вариант №1

На рис. 3.6 представлены интегральные значения мощности тепловыделения в роторе, а нарис.3.7 – интегральное значение полного крутящего момента ротора.

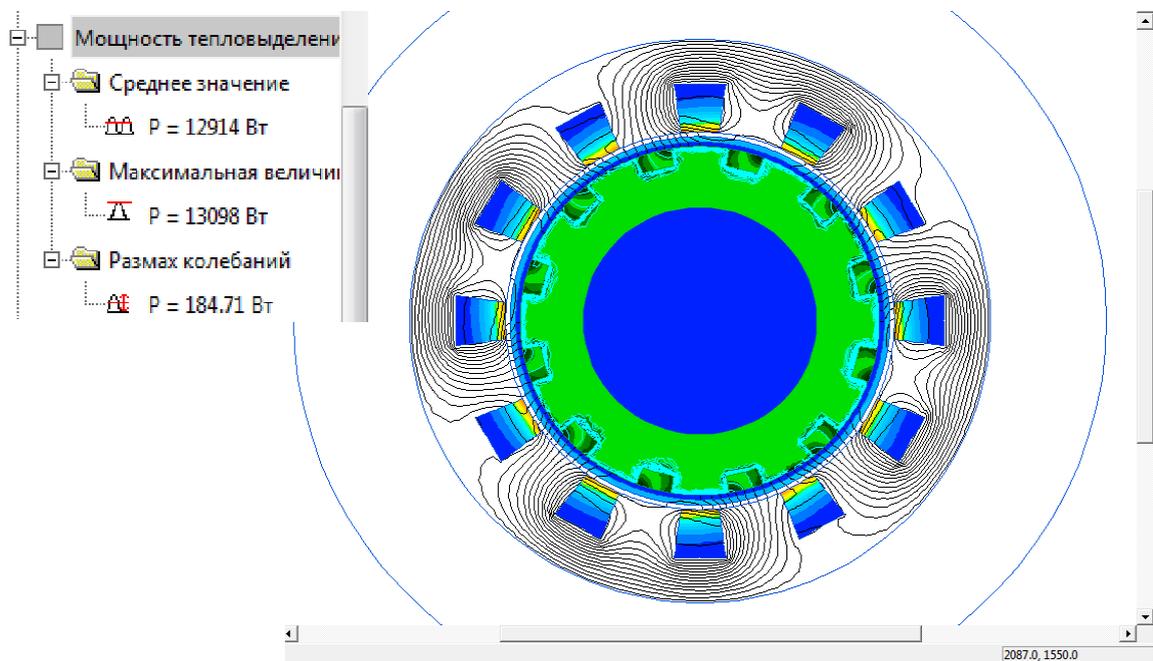


Рис. 3.6. Мощность тепловыделения в роторе

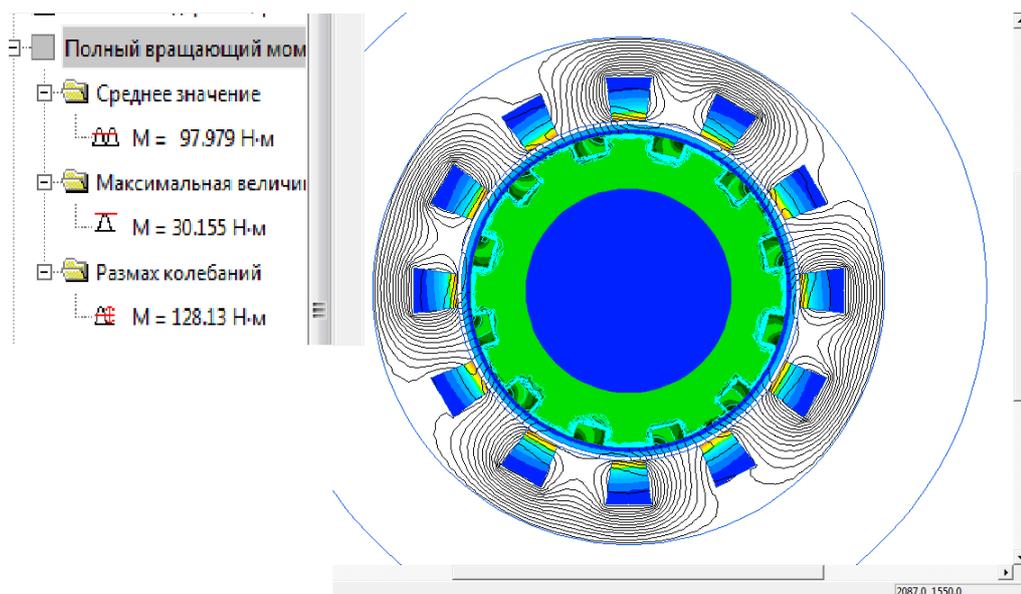


Рис. 3.7. Вращающий момент ротора, вариант №1

На рис. 3.8, 3.9 представлены графики распределения плотности тока и тепловыделения в различных элементах конструкции. Здесь участок №1 – плотность тока в обмотке статора, участок №2 – плотность тока в трубе из нержавеющей стали, участок №3 – плотность тока в беличьей клетке ротора. Отсчет расстояния ведется от дна паза статора.

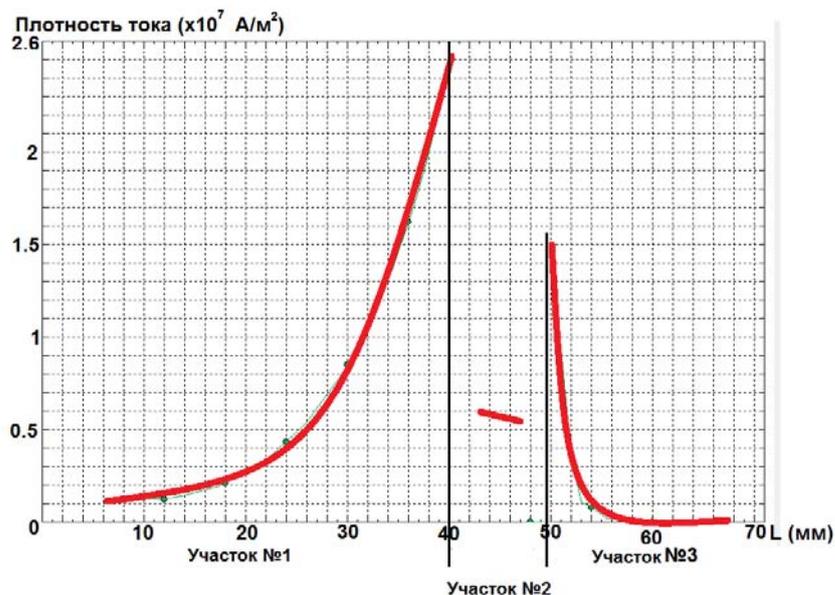


Рис. 3.8. График плотности тока

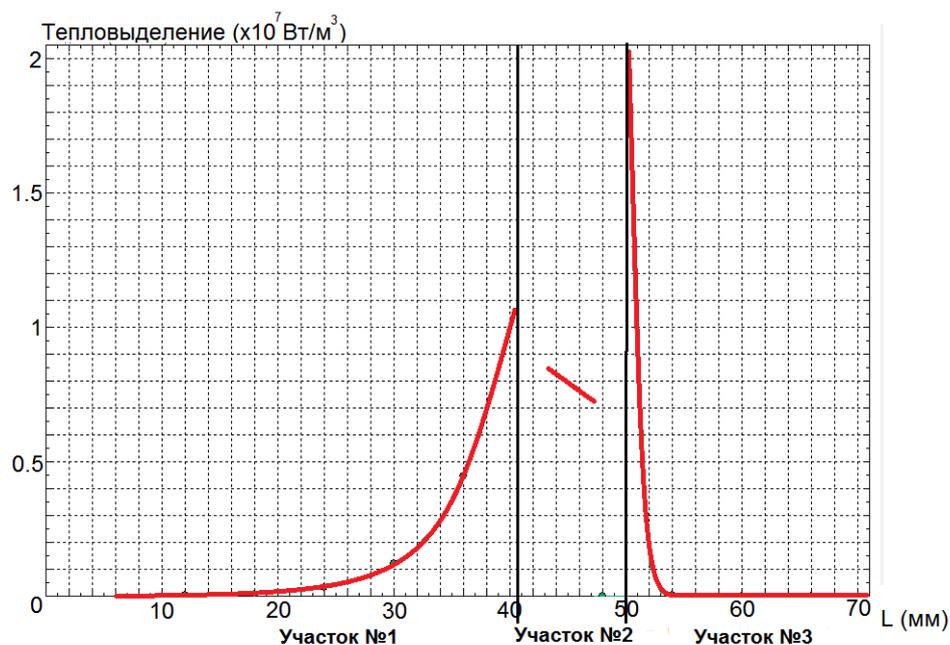


Рис. 3.9. График тепловыделения

На графике, показанном, на рис. 3.10 показан график плотности тока, построенный по линии, которая проходит между пазов статора. Участок №1 значение плотности тока в немагнитной трубе, на участке №2 плотность тока в беличьей клетке, на участке №3 находится значение плотности тока в стальном роторе.

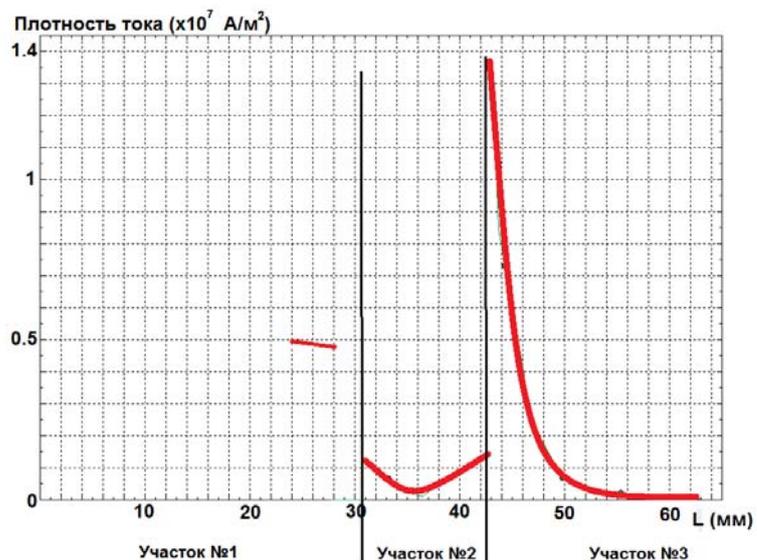


Рис. 3.10. График плотности тока

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 при другом числе пар полюсов. На рис. 3.11 показана другая схема соединения обмоток индуктора, которая соответствует одной паре полюсов статора. Для этой схемы соединения выполнены аналогичные расчеты. При этом все остальные параметры и характеристики оставлены прежними, без изменений.

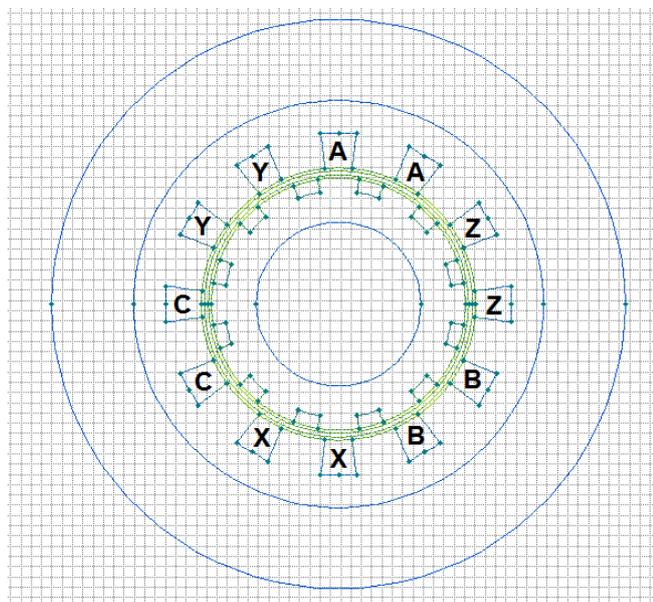


Рис. 3.11.2 –х полюсный вариант обмотки статора, вариант №2

На рисунках 3.12 – 3.17 представлены результаты расчета параметров устройства – плотности тока, удельной мощности тепловыделения, вращающего момента.

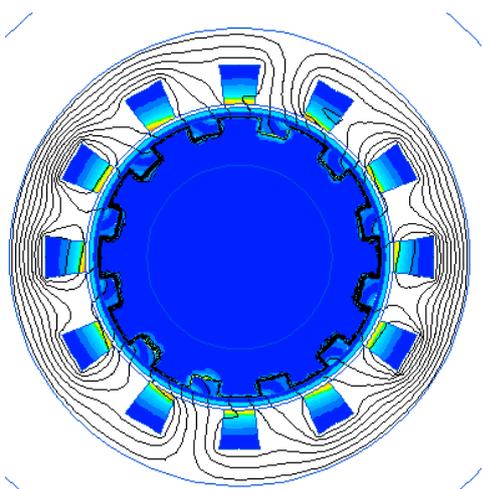


Рис. 3.12. Распределение плотности тока с линиями индукции, вариант №2

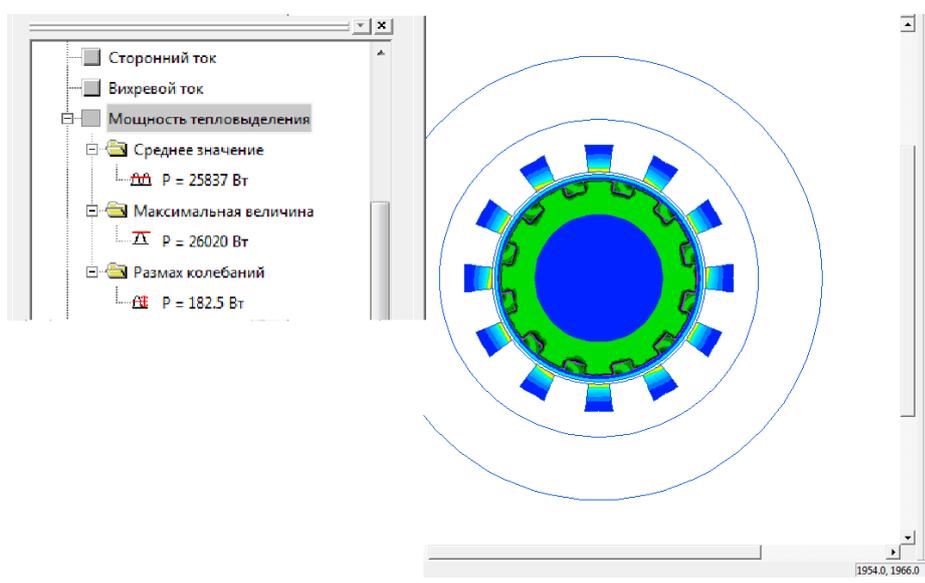


Рис. 3.13. Интегральное значение мощности тепловыделения в роторе, вариант №2

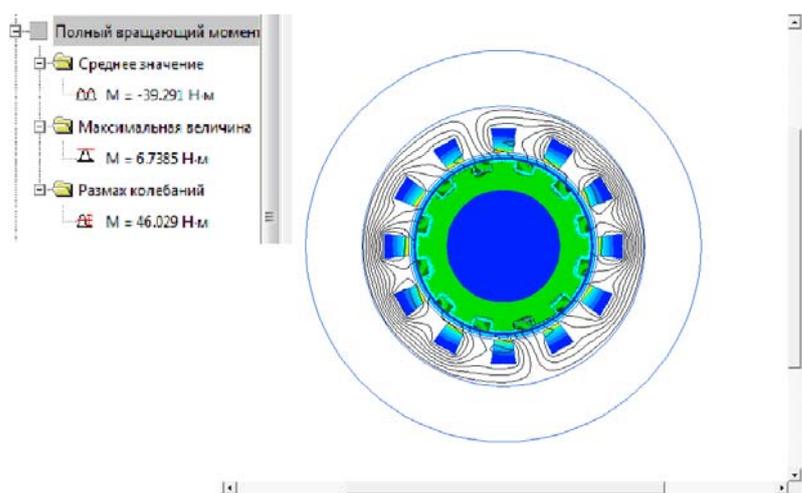


Рис. 3.14. Интегральное значение полного крутящего момента ротора в режиме К.3., вариант №2

На рис. 3.15 и рис 3.16 представлены графики плотности тока и тепловыделения в различных элементах устройства. Здесь участок №1 – плотность тока в обмотке индуктора, участок №2 – значения плотности тока в трубе из нержавеющей стали, участок №3 – плотность тока в беличьей клетке ротора. Отсчет расстояния ведется от дна паза магнитопровода.

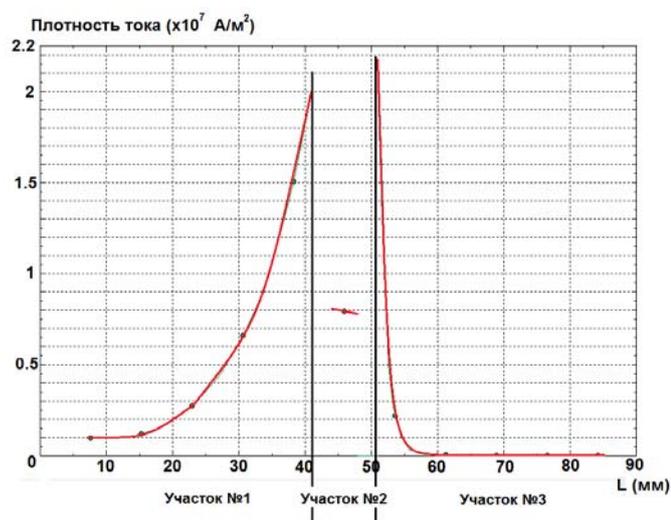


Рис. 3.15. График плотности тока

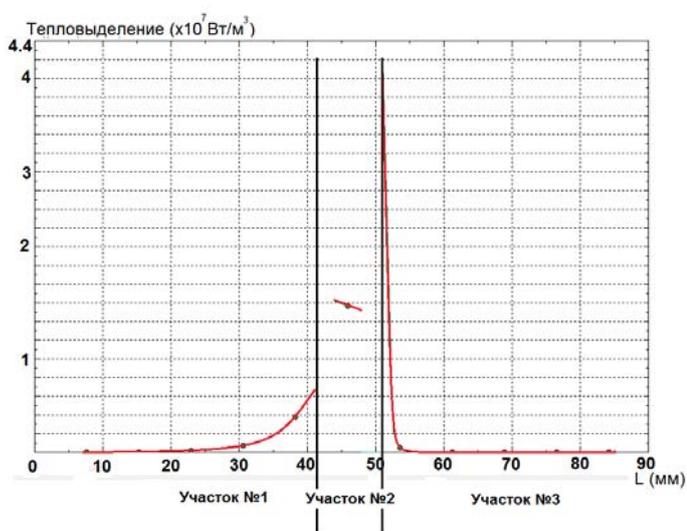


Рис. 3.16. График мощности тепловыделения

На графике, показанном, на рис. 3.17 приведены значения плотности тока, построенные по линии, которая проходит между пазами статора. На участке №2 показано значение плотности тока в немагнитной трубе, на

участке №3 плотность тока в беличьей клетке, на участке №4 находится значение плотности тока в стальном роторе.

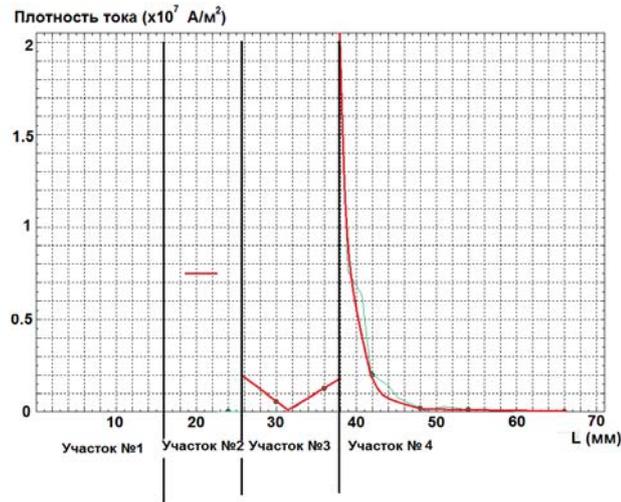


Рис. 3.17. График плотности тока

На основании проведенных исследований выполнен сравнительный анализ эффективности функционирования исследуемого устройства. В таблице 2 приведены интегральные характеристики исследуемого устройства с двумя и четырьмя полюсами.

Сравнительные характеристики смесителя

Таблица 3.2

Параметр	Вариант расположения фаз №1	Вариант расположения фаз №2
Частота источника питания	50	50
Ток [А]	6500	5400
Напряжение [В]	5,27	6,27
Момент [Н/м]	99	39,2
Частота вращения [об/мин]	352	704
Полная мощность [ВА]	44221	43858
Мощность реактивная [ВАр]	35377	32893
Полная активная мощность, Вт	26533	31326,28
Мощность на нагрев роторе [Вт]	12914,5	25837
Мощность на нагрев немагнитной трубе [Вт]	1120	2380
Мощность на вращение [Вт]	13638,5	3109,28
Доля мощности на нагрев	0,528	0,9
Сosφ	0,625	0,71

Механическая характеристика устройства приведена на рис. 3.18. Для сравнения дана характеристика асинхронного двигателя.

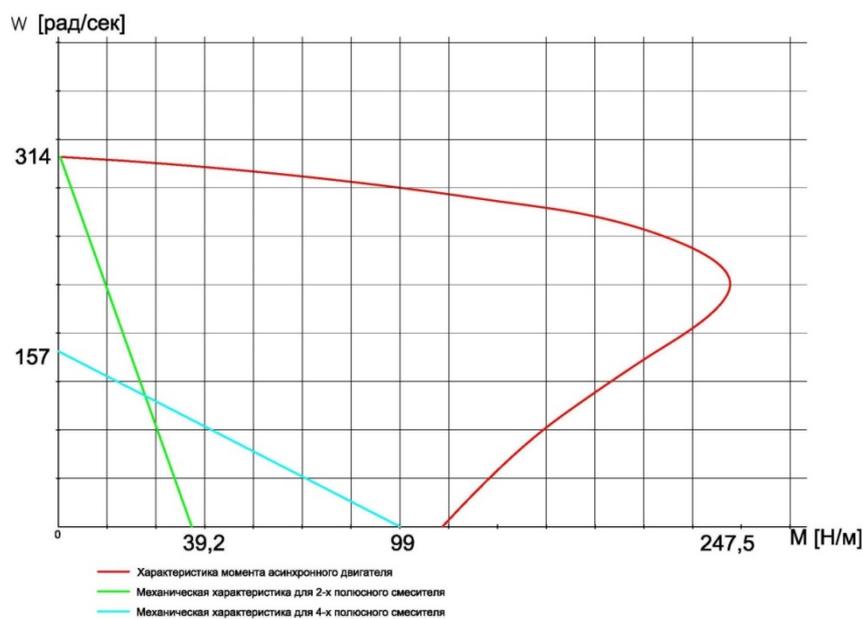


Рис.3.18 Механическая характеристика трехфазного индуктора

Как следует из графика, механическая характеристика смесителя мягкая, что обусловлено наличием большого зазора между статором и ротором. в то же время, как показывают расчеты, для эффективного перемешивания нефти частота вращения лежит в пределах $45 \div 90$ рад/с, что соответствует характеристике исследуемого устройства.

3.4. Расчет вращающего момента для исследуемой установки

Необходимый для перемешивания нефти момент вращения рассчитывается по методике, предложенной в работе [83]. Алгоритм расчета представлен на рис.3.19 На первом этапе выполняется расчет, в котором в качестве рабочей жидкости рассматривается вода. Затем, используя коэффициенты приведения, производится пересчет мощности и момента для вязкой жидкости с учетом её реальных характеристик.

Исходные данные, необходимые для расчета, приведены в таблице №3.3.

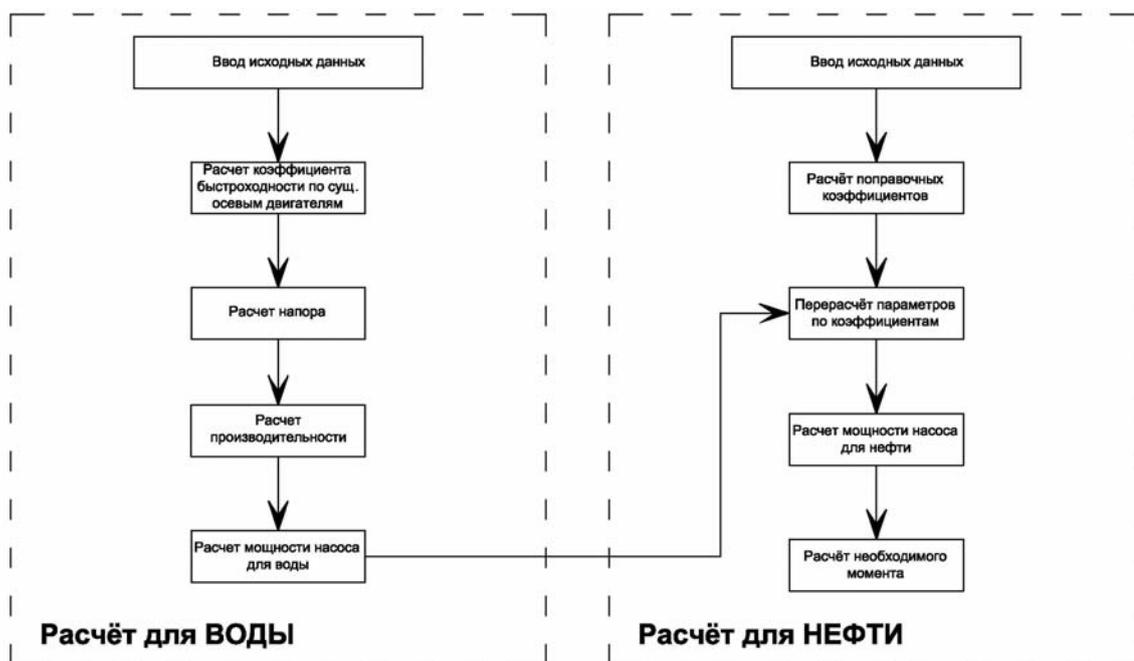


Рис. 3.19. Алгоритм расчета мощности и момента

Исходные данные для расчета гидравлической задачи

Таблица 3.3

Наименование	Величина	Размерность	Обозначение
Скорость потока до установки	0,05	м/с	v_H
Скорость потока после установки	0,1	м/с	v_K
Давление потока до установки	10	кгс/см ²	p_H
Давление потока после установки	12	кгс/см ²	p_K
Коэффициент быстроходности	30		n_s
Угловая скорость	37	рад/с	ω
Плотность среды (вода)	1000	кг/м ³	ρ_B
Плотность среды (нефть)	920	кг/м ³	ρ_H
Вязкость (нефть)	4,5	см/сек ²	ν

По исходным данным определяется напор, создаваемый насосом

$$V_z = k_v \sqrt{2gH},$$

Где $K_H^2 = 0,0244n_s^{0,66}$, n_s – коэффициент быстроходности.

Определяется полезная мощность:

$$N_{\text{п}} = \frac{Q p_{\text{в}} g H}{102},$$

где – идеальная подача осевого насоса:

где d – рекомендуемый диаметр ступицы, V_z – осевая скорость:

$$d = (0,4 \dots 0,5) \times D; V_z = k_v \sqrt{2gH}; k_v = 0,055 n_s^{0,66}$$

Определяем мощность установки с учётом потерь:

$$N = \frac{N_{\text{п}}}{0,7}$$

Для перерасчёта параметров необходимо задать дополнительные данные, приведенные в таблице.

Данные для перерасчета на нефть

Таблица 3.4

Наименование	Величина	Размерность	Обозначение
Толщина лопатки	0,03	м	b
Ширина лопатки	0,25	м	q
Число рядов лопаток	4	шт	z

Определяется коэффициент стеснения:

$$K_2 = \frac{\pi D - qz}{D\pi} = \frac{t_2 - q}{t_2}, \text{ где } t_2 \text{ – шаг лопаток.}$$

Определяется эквивалентный диаметр рабочего колеса:

При максимальной идеальной подаче насоса находится число Рейнольдса для вязких жидкостей:

Дальнейший расчёт выполняется с помощью опытных поправочных коэффициентов, которые находятся из графика [83] (рис. 3.20).

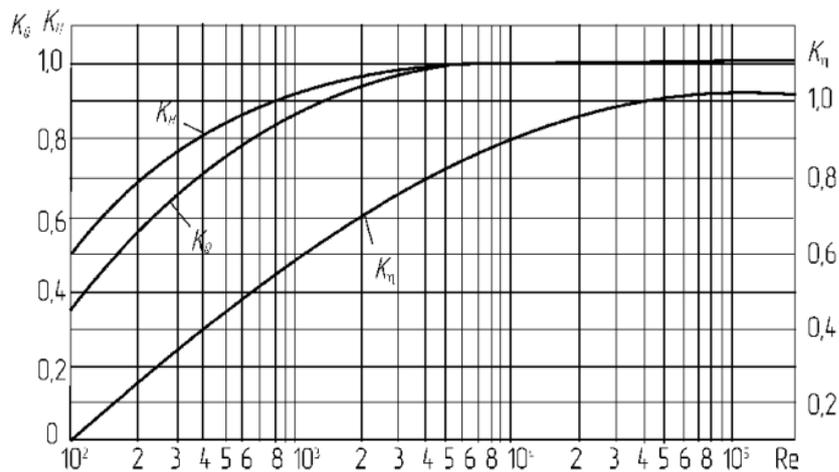


Рис.3.20 Зависимость коэффициентов от числа Рейнольдса

С помощью коэффициентов определяются значения подачи, напора и КПД, для вязкой жидкости:

Рассчитывается значение полезной мощности:

Находится момент необходимый для вращения:

В результате расчета получаем необходимое минимальное значение момента для начала вращения, т.е. момент трогания. По результатам расчета для исследуемого устройства с параметрами, приведенными в таблице 3.3, 3.4 момент трогания составляет 76Нм. По результатам расчета электромагнитной задачи максимальный момент для схемы соединения обмоток в 4-х полюсном варианте составляет 99Нм, что свидетельствует о том, что момент, развиваемый ротором, соответствует моменту вращения смесителя.

На рис. 3.21–3.25 приведены сравнительные графики плотности тока, объемной мощности тепловыделения и вращающего момента для двух вариантов схемы соединения обмоток индуктора или числа пар полюсов.

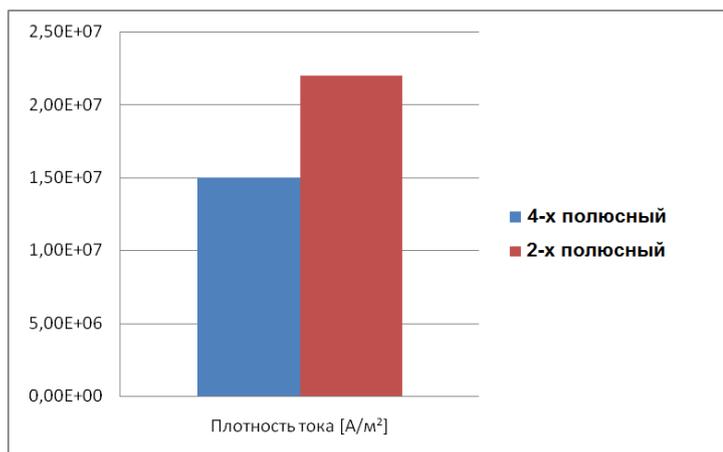


Рис. 3.21. Плотность тока ротора для двух схем соединения обмоток

На рис.3.22 представлено сравнение значений мощности, идущей на тепловыделение в роторе.

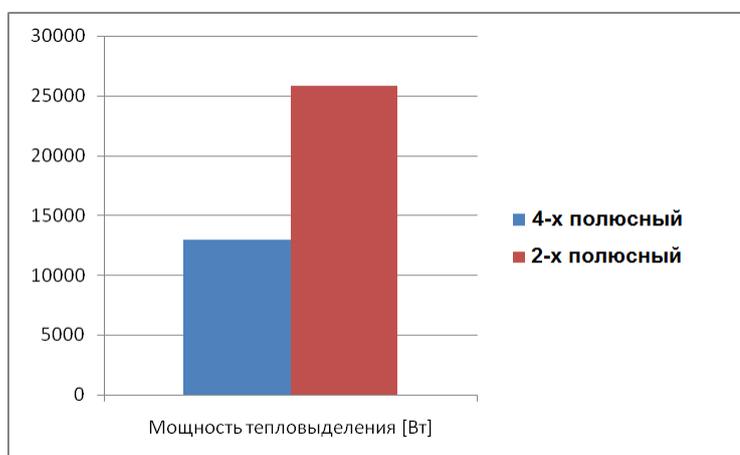


Рис. 3.22 Значения мощностей тепловыделения для разных схем соединения катушек

На рис.3.23 представлено сравнение значений полного крутящего момента ротора.

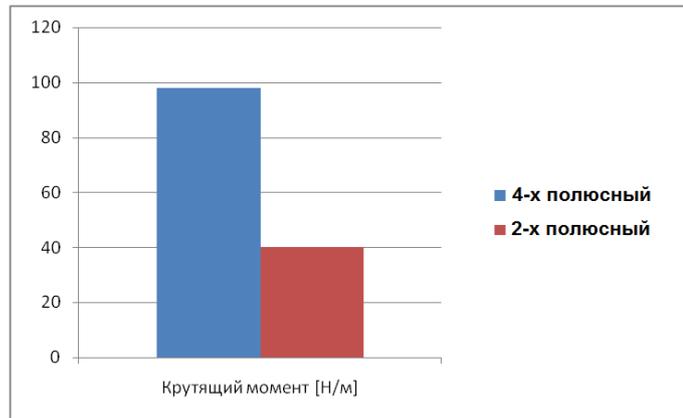


Рис. 3.23. Крутящий момент для двух схем соединения катушек

На рис.3.24 представлено сравнение значений объемного тепловыделения в роторе.

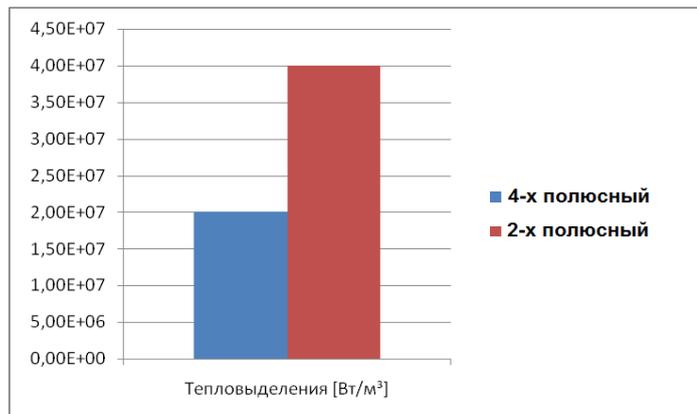


Рис. 3.24. Тепловыделение в роторе для двух схем соединения катушек

На рис. 3.25 представлено сравнение доли мощности, идущей на нагрев для двух схем соединения катушек.

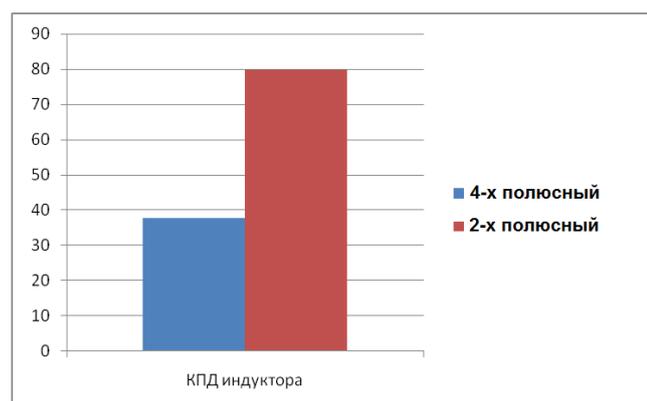


Рис. 3.25. Распределение мощности, идущей на нагрев, для двух схем соединения обмоток

Как следует из сравнительного анализа, мощность тепловыделения при двухполюсной системе увеличилась более чем в два раза по сравнению с

четырёхполюсной. В то же время вращающий момент существенно уменьшился. Следовательно, изменение схемы соединения обмоток индуктора (или изменение числа пар полюсов) можно использовать для выбора оптимального режима работы устройства в зависимости от реологических свойств нефти, в первую очередь, от вязкости. Первый вариант целесообразно использовать в том случае, когда требуется более эффективный нагрев, а второй вариант – когда необходимо получить максимальный вращающий момент для интенсивного перемешивания.

Выводы.

– Предложена численная модель взаимосвязанных электромагнитных, электродинамических и тепловых процессов в системе «трехфазный индуктор – труба – ротор – поток нефти»;

– Разработаны алгоритм и методика расчета энергетических параметров трехфазного устройства для нагрева и перемешивания потока жидкости;

– С помощью уточненной численной модели исследованы энергетические характеристики устройства. Показана возможность использования трехфазного индуктора с вращающимся магнитным полем для создания вращающего момента ротора и нагрева жидкости теплом, выделяемым в стенке ротора.

– Установлена зависимость между тепловой мощностью, идущей на нагрев и мощностью, идущей на вращение ротора. Показано, что соотношение мощностей зависит от числа пар полюсов индуктора.

– Анализ численных экспериментов показал, что изменение схемы соединения катушек индуктора можно использовать для выбора режима работы устройства в зависимости от реологических свойств нефти, в первую очередь, от вязкости.

4. РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

Существует большое количество модификаций индукционных нагревателей, используемых при перекачки вязкой нефти [109, 111, 115]. Конструкция и режимы их работы определяются характеристиками нефти и прежде всего реологическими свойствами [92, 94, 96, 97], температурным режимом, производительностью. Эти величины оказывают существенное влияние на размеры нагревательной системы и распределение мощности. Многообразие конструкций приводит к необходимости совершенствовать известные методики расчета в зависимости от конкретной технологической ситуации.

Температурный режим, вязкость жидкости и зависящий от неё характер течения оказывают преобладающее влияние на уровень мощности и ее пространственное распределение.

Предлагаемая в работе [34] конструкция индуктора для подогрева нефти состоит из осесимметричных систем двух труб, в зазоре между которыми прокачивается жидкость. Качество нагрева и энергоэффективность такой установки повышается в случае проникновения вихревых токов во внутреннюю трубу, с этой целью для внешней трубы принята немагнитная сталь, а для внутренней трубы – ферромагнитная.

Для того, чтобы обеспечить равномерное распределение мощности между внешней и внутренней трубами, необходимо использовать низкие частоты (не более 50Гц при толщине стенки трубы 0,008м). Однако, из-за большого эквивалентного зазора между катушкой индуктора и металлом существенно снижается коэффициент мощности системы.

В качестве альтернативного варианта в настоящей работе предложен индукционный нагреватель, состоящий из ферромагнитной трубы с внутренним оребрением, на которую намотана катушка индуктора.

Применение одной трубы с внутренним оребрением позволяет применять более высокую частоту (напр., $500 \div 2500$ Гц), увеличить удельную мощность нагрева, снизить массу нагревателя по сравнению с известным вариантом с внутренним вытеснителем, значительно повысить коэффициент мощности системы.

В настоящей работе исследование электротепловых процессов и расчет параметров выполнен для индукционного нагревателя, эскиз которого представлен на рис. 4.1. Труба 3 с внутренним оребрением находится в полости цилиндрического индуктора 1. Тепловая и электрическая изоляция 2 отделяет индуктор от трубы. Ребра делят поток на несколько отдельных потоков меньшего сечения, увеличивая площадь теплообмена.

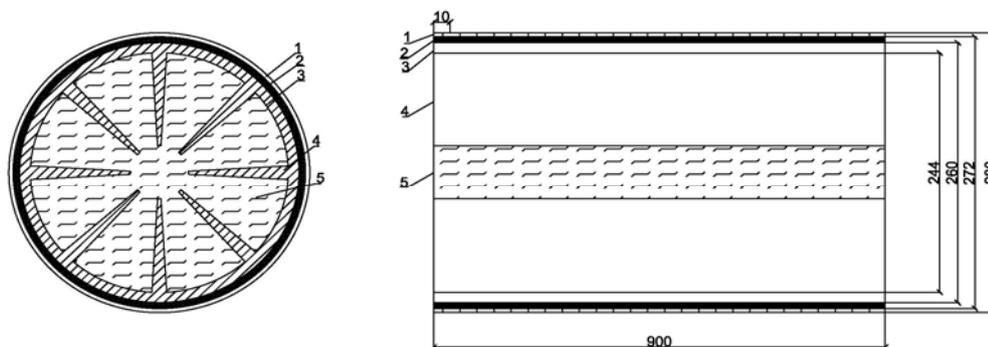


Рис 4.1. 1 Конструкция нагревателя в разрезе

1 –Витки индуктора; 2 –Изоляция; 3 –Труба; 4 –ребра; 5 –Нефть;

Исходные данные для расчета приведены в таблице 4–1.

Параметры цилиндрического индукционного нагревателя

Таблица 4.1

Наименование	Условное обознач.	Величина	Размерность	Примеч
Конструктивные параметры.				
Длина секции для расчета двухмерной задачи		0,3	м	var
Длина секции для расчета трехмерной задачи		0,15	м	var
Производительность		90	т/сутки (1 ветка)	var
Диаметр внешней трубы	$D_н$	0,266	м	const
Толщина изоляции	$h_{\text{футер.}}$	0,005	м	var
Толщина стенки трубы	$h_{\text{труб.}}$	0,008	м	const
Высота ребра		0,093	м	const

Толщина ребра		0,016	м	const
Ширина ребра	$a_{\text{ребра}}$	0,1	м	const
В электромагнитной задаче				
Размеры витка	$a \times b$	10×10	мм	const
Межвитковое расстояние	$l_{\text{межв.}}$	0,0015	м	var
Удельное сопротивление стали	$\rho_{\text{стали}}$	$10,3 \times 10^{-8}$	Ом× м	$f(T)$
Удельное сопротивление меди	$\rho_{\text{меди}}$	$1,8 \times 10^{-8}$	Ом × м	$f(T)$
Витки индуктора	W	12		var
Частота	f	50...2500	Гц	const
Мощность	P	12,48	кВт	
В гидравлической задаче				
Вязкость нефти	$\nu_{\text{неф.}}$	$8,26 \cdot 10^{-2}$	м ² /с	$f(T)$
Средняя скорость нефти	$g_{\text{неф.}}$	0,043	м/с	var
Давление продукта		25	МПа	
Степень шероховатости труб		0,0002	м	
В тепловой задаче				
Плотность нефти		980	кг/м ³	f(T)
Теплопроводность нефти		0,19	кДж/кг × С°	f(T)
Удельная теплоемкость нефти		2,28	кДж/кг × С°	f(T)
Плотность стали	$\rho_{\text{стали}}$	7830	кг/м ³	const
Теплопроводность стали	$\alpha_{\text{стали}}$	33,5	Вт/м × С°	
Теплоемкость стали	$c_{\text{стали}}$	0,6	Вт/м × С°	
Степень загрязнений стенок		1160	Вт/м ² × К × 1/грамм	
Параметры полученные в результате расчета				
Температура нефти на входе	$T_{\text{нач.}}$	20	С°	var
Температура нефти на выходе	$T_{\text{кон.}}$	31	С°	
Мощность выделяемая в трубе	$P_{\text{тр.1}}$	11054	Вт	var
КПД тепловой	$\eta_{\text{тепл.}}$	88	%	var

Исходные геометрические размеры труб нагревателя приняты с таким расчетом, чтобы в целях удобства монтажа они совпадали или были близки с геометрическими размерами трубопровода системы, для которой рассчитывается данный нагреватель.

4.1. Расчет электромагнитных источников теплов двухмерной задаче

На рис. 4.2 приведена модель нагревателя, для которой производится расчет параметров электромагнитного поля в исследуемой

системе. Здесь: 1 –индуктор; 2 –труба с внутренним оребрением; стрелками указано направление потока жидкости в трубе. Геометрические размеры нагревателя приведены выше.

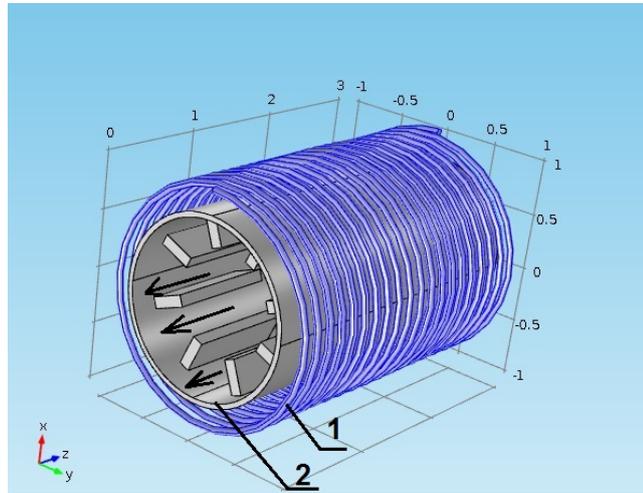


Рис. 4.2 .Расчетная модель индукционного нагревателя

Все размеры, параметры, размерности, используемые в численных моделях, строго соответствуют исходным данным, которые приведены выше.

Алгоритм расчета представлен на рис. 4.3.

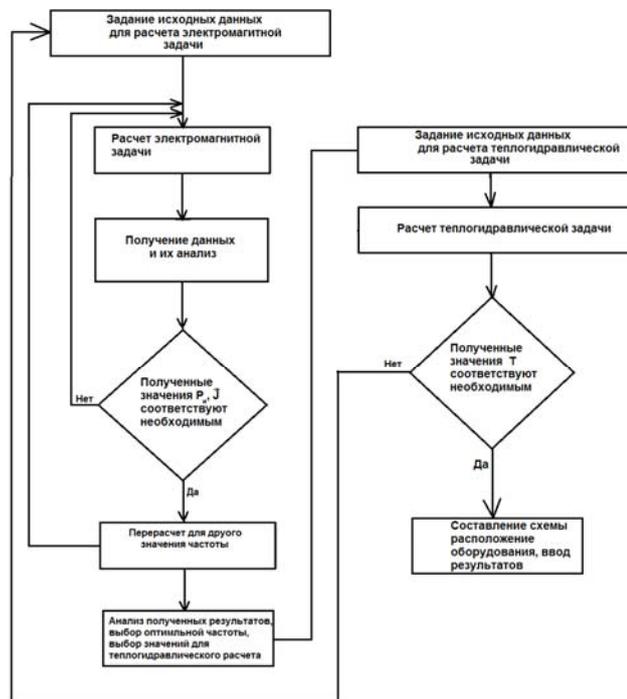


Рис. 4.3. Алгоритм решения задачи

Решение задачи производится в комплексе программ Comsol, На рис. 4.4 представлена модель с построенной сеткой конечных элементов [98]. Сетка конечных элементов состоит из 13453 элементов, для решения использовался ПК с объемом оперативной памяти 4096 Мб

.На первоначальном этапе задача решается в двухмерной постановке.

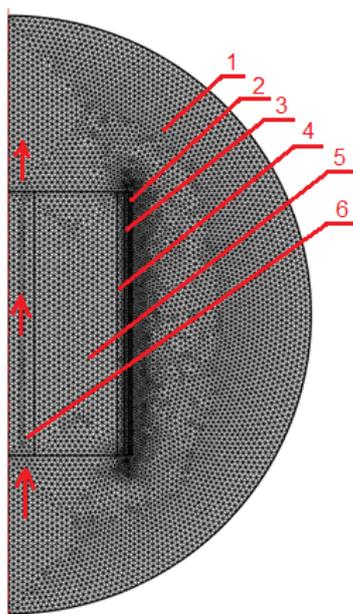


Рис. 4.4. Расчетная модель с сеткой конечных элементов.

1 – воздушное пространство; 2 – катушка индукционного нагревателя, 3 – теплоизоляция, 4 – труба, 5 – ребро, 6 – нефть; стрелками указанно направления потока

Ниже на рис. 4.5 – рис. 4.12 приведены результаты расчета при различных значениях частоты. В расчетах задавался стандартный ряд частот в пределах от 50 до 2500 Гц. Результаты решения приведены в виде картин распределения магнитной индукции, плотности тока, удельной мощности тепловыделения для различных частот. На рис. 4.5 показано распределение магнитного поля и индукции для расчетной геометрической модели при частоте 50 Гц и 500 Гц с цветовой индикацией величины индукции.

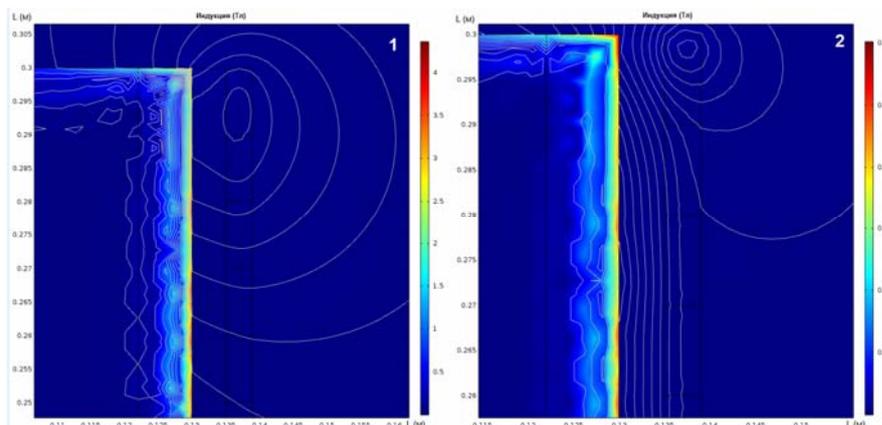


Рис. 4.5. Магнитная индукция в системе «индуктор – труба».

1 – на частоте 50 Гц; 2 – на частоте 500 Гц

На рис.4.6 показано распределение магнитного поля и индукции для расчетной геометрической модели при частоте 1000 Гц и 2500 Гц с цветовой индикацией величины индукции.

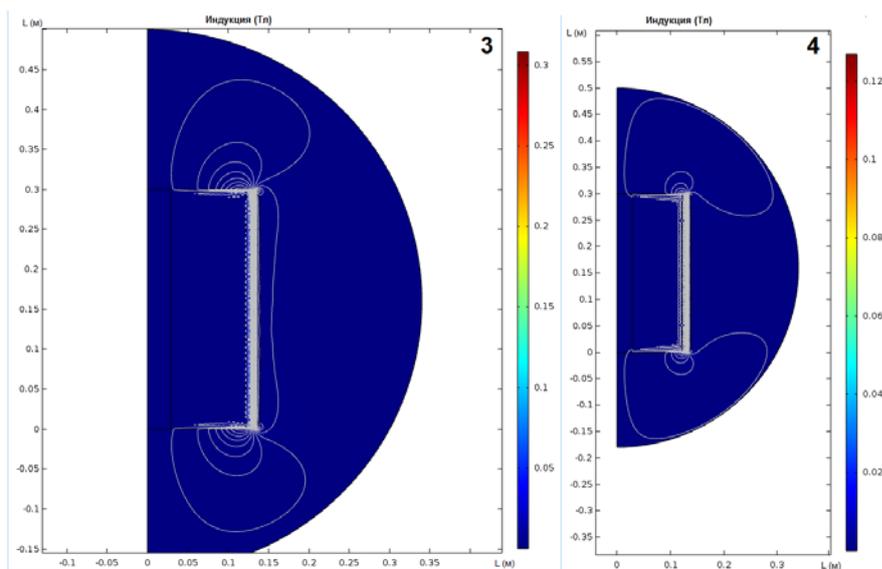


Рис.4.6. Магнитная индукция в системе «индуктор – труба».

1 – на частоте 1000 Гц; 2 – на частоте 2500 Гц

На рис.4.7 показано распределение плотности тока в витках индуктора и в нагреваемой трубе. Результаты приведены для частот 50 Гц и 500 Гц. Указана цветовая индикация, по которой можно определить области наибольшей плотности тока. На рис.4.8 построены графики поверхностной плотности тока по длине трубы при частоте 50 Гц и 500 Гц.

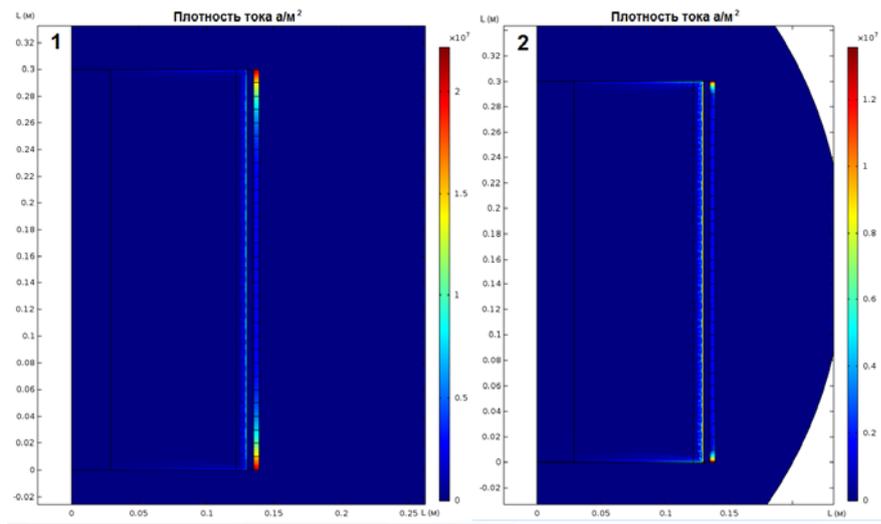


Рис. 4.7. Значение плотности тока при частоте 1 –50 Гц, 2 –500 Гц

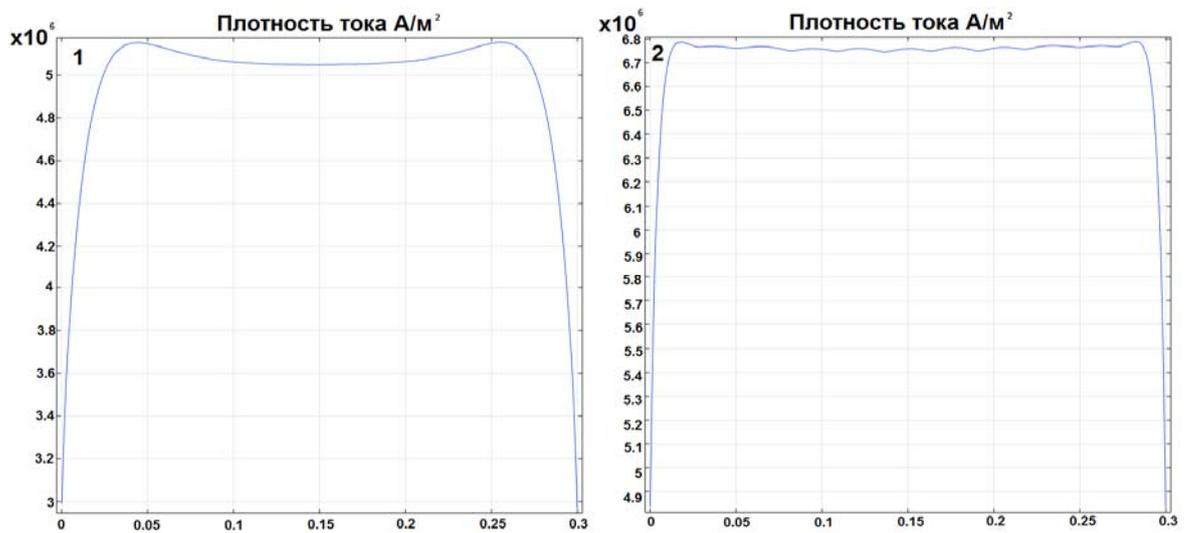


Рис. 4.8 Графики плотности тока на поверхности трубы, для исследуемого индуктора при частоте 1 –50 Гц, 2 –500 Гц

На рис.4.9 приведена картина распределения плотности тока в витках индуктора и в нагреваемой трубе для частот 1000 Гц и 2500 Гц.

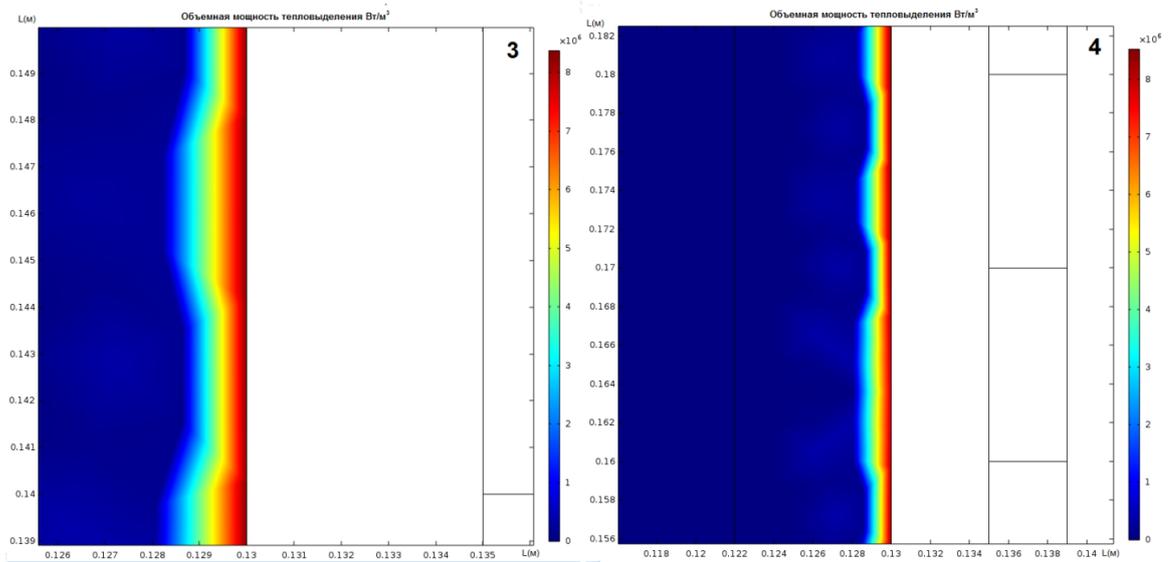


Рис. 4.9. Значение плотности тока при частоте 3 –1000 Гц, 4 –2500 Гц

На рис.4.10 построены графики поверхностной плотности тока по длине трубы при частоте 1000 Гц и 2500 Гц. Анализ результатов расчета позволяет сделать вывод, что плотности тока на частотах 500, 1000 и 2500 Гц выше по сравнению с аналогичными экспериментами на частоте в 50 Гц.

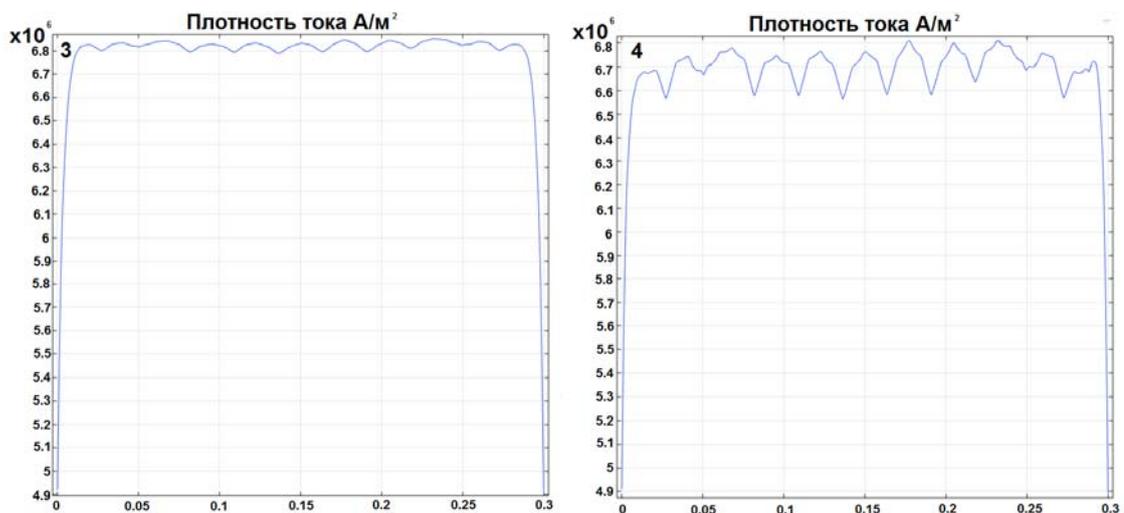


Рис. 4.10. Графики плотности тока на поверхности трубы при частоте тока 3 –1000 Гц, 4 –2500 Гц

На рис.4.11 показано распределение объемной мощности тепловыделения в нагреваемой трубе для частот 50 Гц и 500 Гц. Вследствие уменьшения глубины проникновения тока на частоте 500Гц увеличилась плотность мощности в поверхностном слое стенки трубы.

На рис.4.12 указано распределение объемной мощности тепловыделения в нагреваемой трубе для частот 1000 Гц и 2500 Гц. Сравнение с результатами расчетов для частоты 500Гц показывает, что мощности тепловыделения на частотах 1000 Гц и 2500 Гц по величине отличаются незначительно.

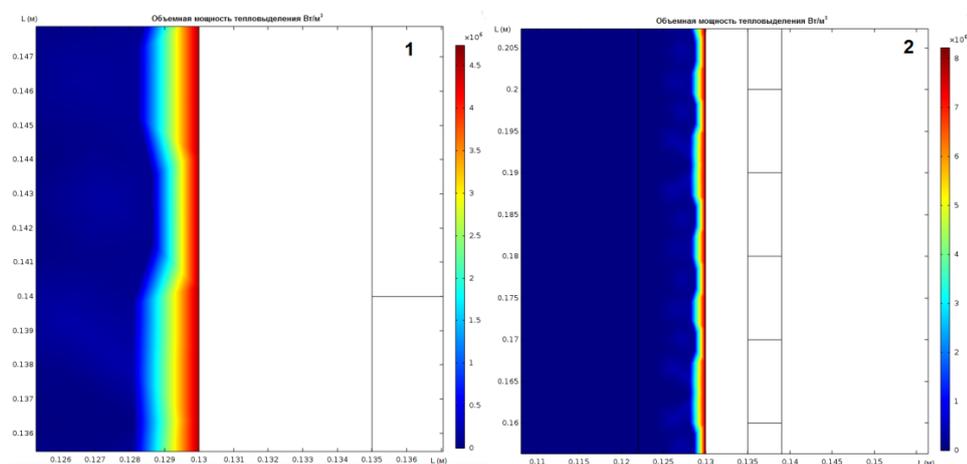


Рис. 4.11. Диаграмма распределения тепловыделения в трубе для частот 1 –50 Гц, 2 –500 Гц

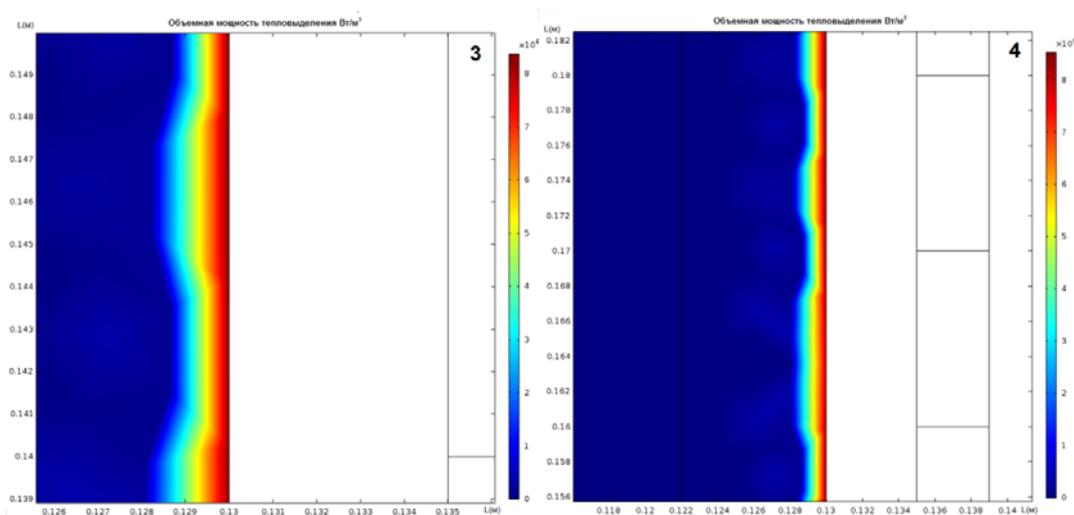


Рис. 4.12. Диаграмма распределения тепловыделения для частот 3 –1000 Гц, 4 –2500 Гц

4.2. Исследование электромагнитных и тепловых процессов в трехмерной области

Двухмерная модель не позволяет исследовать температурное распределение в системе «труба с внутренним оребрением –жидкость». Для

исследования влияния оребрения на теплопередачу в жидкость тепловые и гидравлические процессы исследовались на трехмерной модели. Параметры исследуемой системы приведены в таблице 4.1 .

Сетка конечных элементов состоит из 48963 элементов, для решения использовался ПК с объемом оперативной памяти 12288 Мб. На рис. 4.13 приведена сетка конечных элементов при решении электромагнитной задачи в трехмерной постановке.

Решение электромагнитной задачи производилось в трехмерной постановке, для детального исследования, распространения расчетных параметров, которые невозможно отследить, при решении двухмерной задачи. По результатам решения были построены интерполяционные изображения различных характеристик, приведенных ниже.

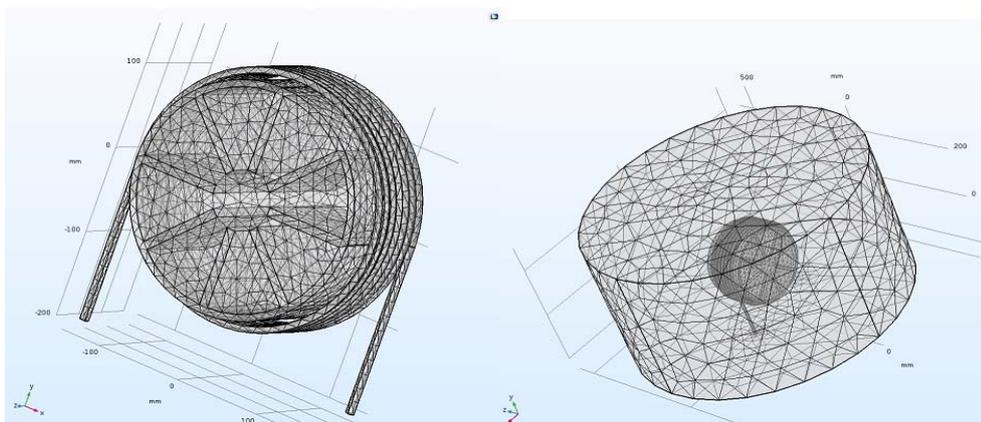


Рис. 4. 13. Сетка конечных элементов при решении электромагнитной задачи в трехмерной постановке

На рис.4.14 показано распределение магнитного поля и магнитной индукции для построенной геометрической модели при частоте 50 Гц и 500 Гц. На рис.4.15 показано распределение магнитного поля и индукции для геометрической модели для частот 1000 Гц и 2500 Гц

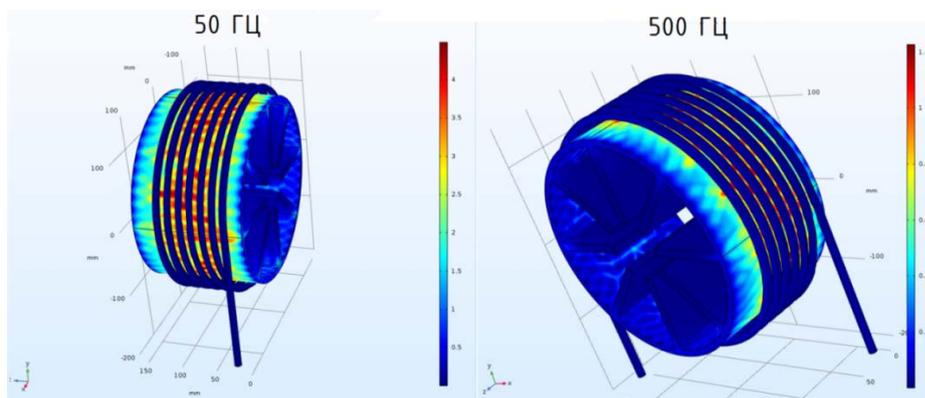


Рис. 4.14. Магнитная индукция для частот 50 и 500 Гц

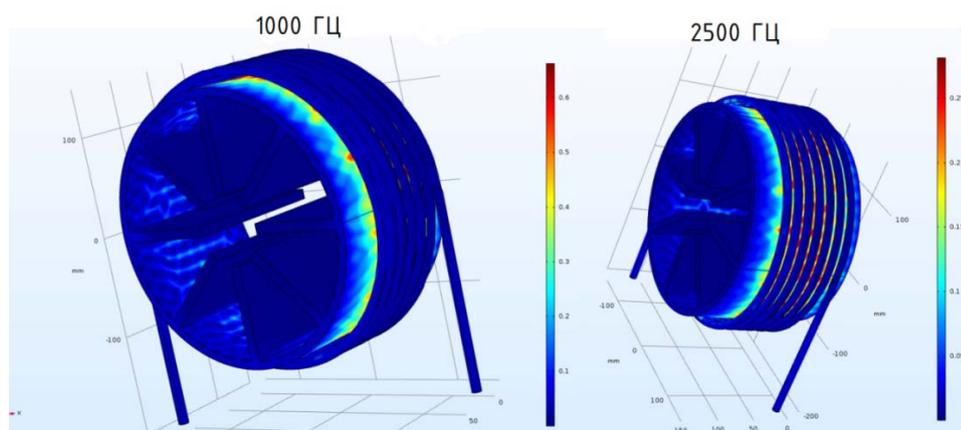


Рис. 4.15. Магнитная индукция для частот 1000 и 2500 Гц

На рис.4.16 показано распределение плотности тока в витках индуктора и в нагреваемой оребренной трубе для частот 50 Гц и 500 Гц соответственно. На рис.4.17 и 4.18 приведены графики плотности тока в трубе. Вертикальными линиями показаны границы катушки индуктора. Как следует из графиков, плотность тока за пределами индуктора быстро затухает. Неравномерное распределение плотности тока под индуктором обусловлена близкими значениями длины индуктора и его диаметра.

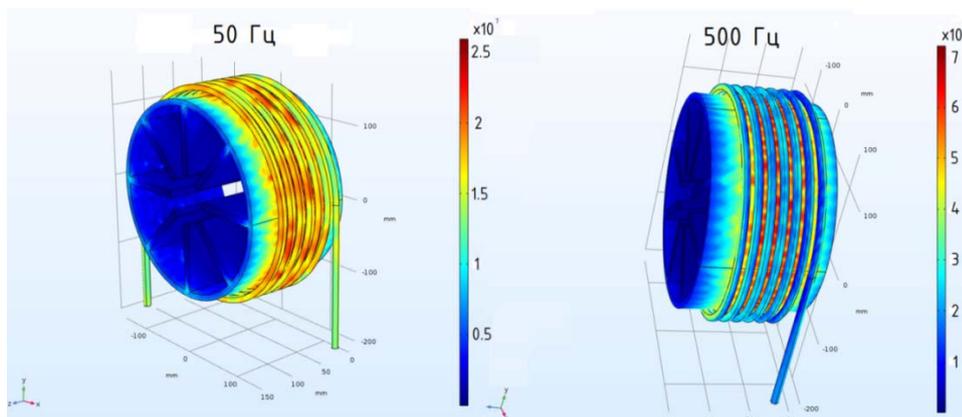


Рис.4.16. Распределение плотности тока для частот 50 Гц и 500 Гц

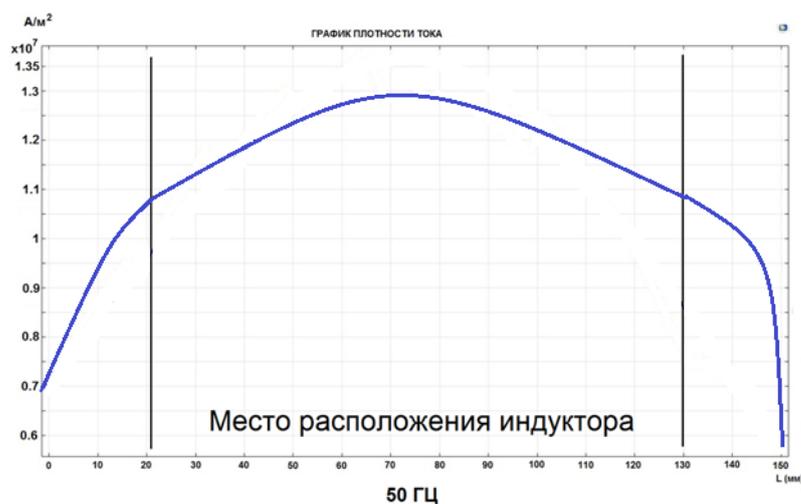


Рис. 4.17. График плотности тока на поверхности трубы для частоты 50 Гц

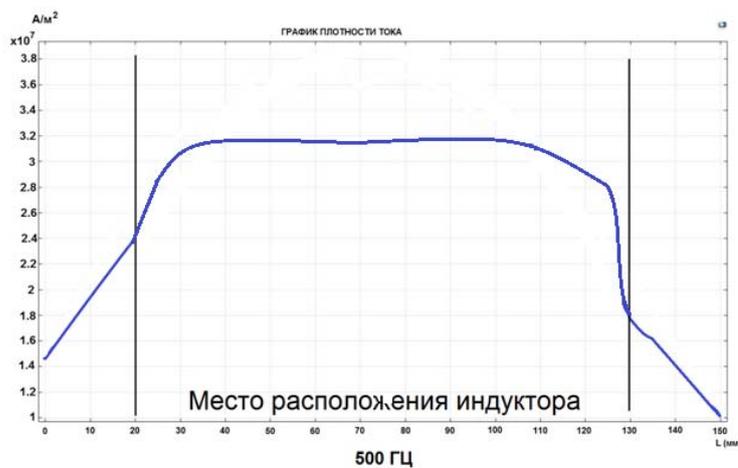


Рис. 4.18. График плотности тока на поверхности трубы для частоты 500 Гц

На рис. 4.19 приведены картины распределения плотности тока в трубе на частотах 1000 и 2500Гц.

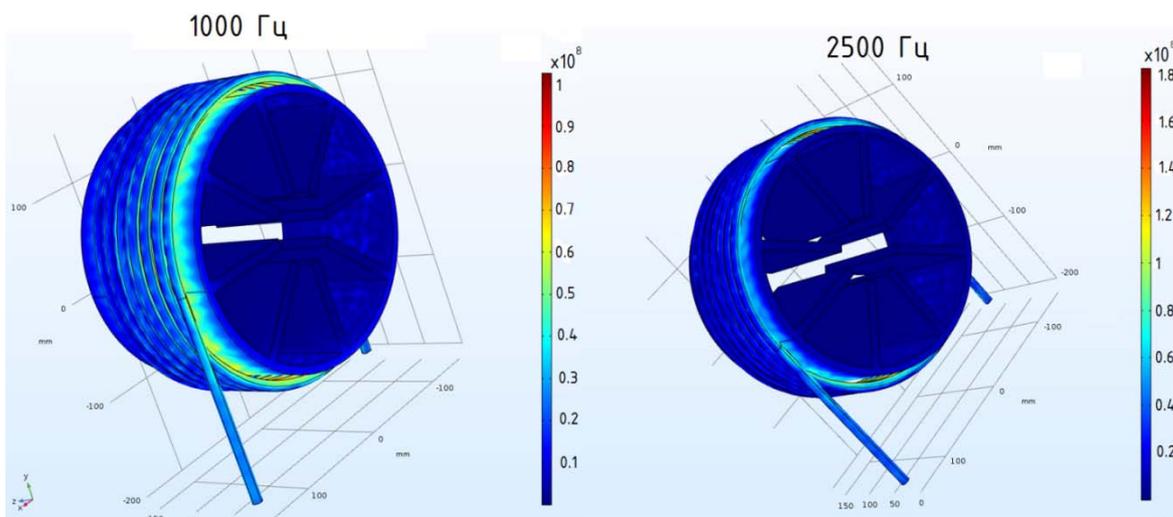


Рис. 4.19. Значение плотности тока на частотах 1000 и 2500 Гц

На рис. 4.20 и 4.21 представлены графики плотности тока для частот 1000 и 2500 Гц. Как следует из графиков, поверхностная плотность тока увеличивается с ростом частоты и характер распределения плотности тока становится более равномерным.

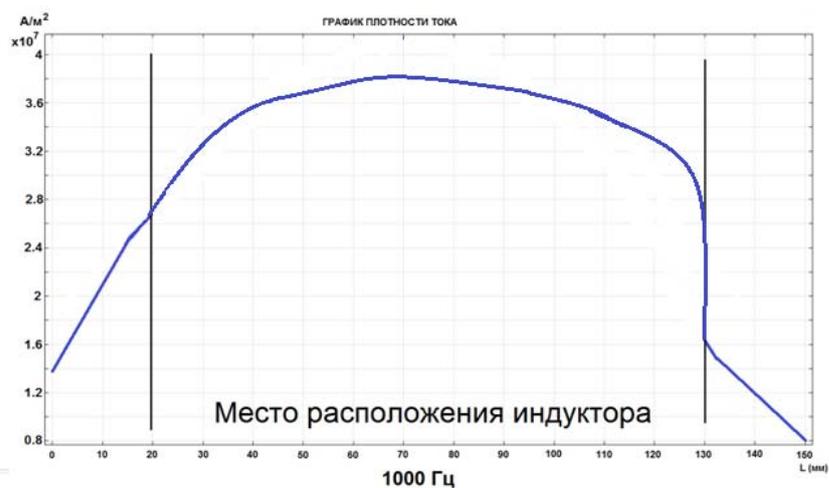


Рис. 4.20. График плотности тока на поверхности трубы. Значение при частоте 1000 Гц

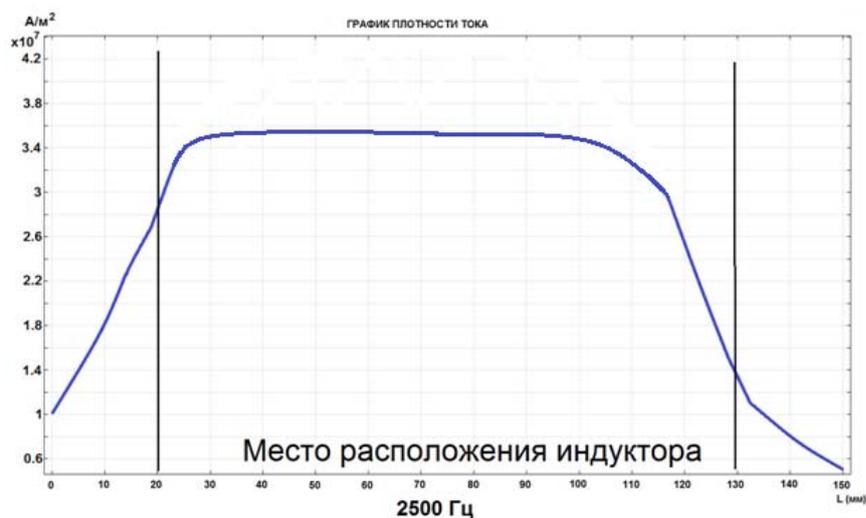


Рис. 4.21. График плотности тока на поверхности трубы.
Значение при частоте 2500 Гц

Энергетические характеристики индукторов на исследуемых частотах приведены в таблице 4.2.

Экспериментальные характеристики

Таблица 4.2

Частота [Гц]	50	500	1000	2500
Активная мощность [Вт]	2406	12417	14137,13	16060
Мощность на нагрев [Вт]	1557	11015	12118	12932
Ток [А]	1000	1000	1000	1000
Напряжение [В]	4,81	22,9	31,41	38,23
Cos φ	0,5	0,48	0,45	0,42
КПД	0,64	0,88	0,85	0,805

По результатам анализа энергетических характеристик на рис. 4.22 приведена диаграмма коэффициентов полезного действия для исследуемых частот. Наиболее эффективной с точки зрения экономии электроэнергии является частота 500Гц.

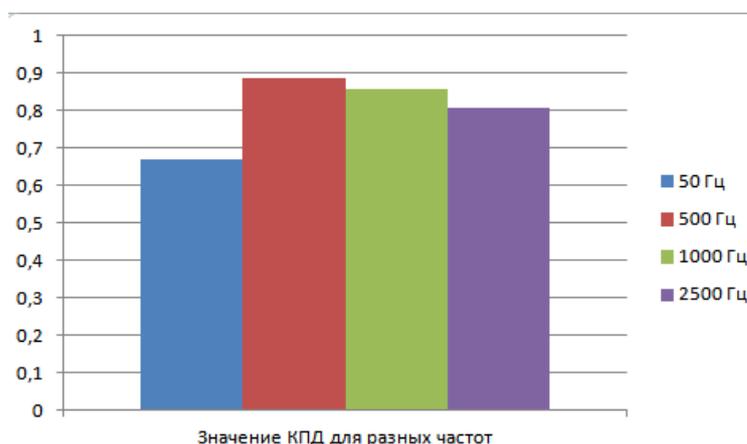


Рис 4.22. Диаграмма значения КПД для разных частот

Далее для выбранной частоты проводилось исследование тепловых полей в системе «индуктор–металл–жидкость». На рис.4.23 показано распределение объемной мощности тепловыделения в системе при частоте 500 Гц, а на рис.4.24 – график распределения объемной мощности тепловыделения по длине системы.

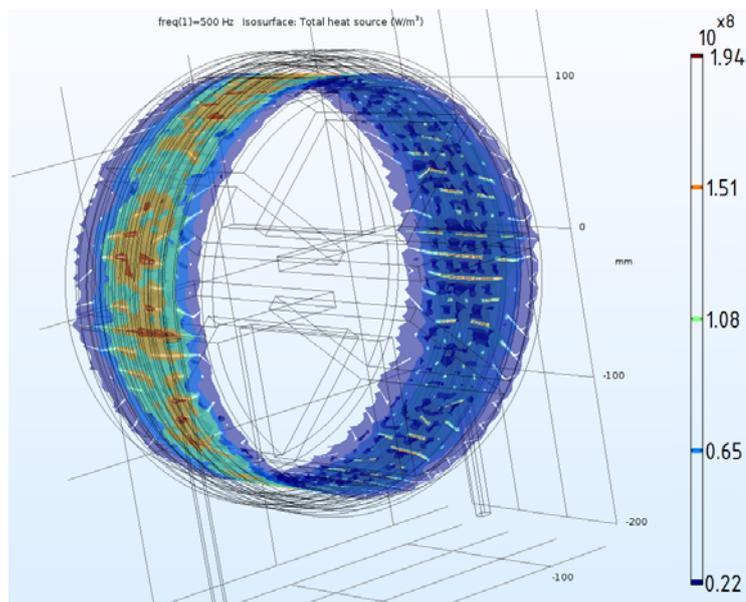


Рис 4.23. Распределение объемной мощности в системе «индуктор – труба–жидкость»

На рис. 4.24 приведен график значений объемной мощности теплового распределения, при частоте 500 Гц, по графику видно, что наибольшая мощность образуется в середине установки, что связано с распределением плотности тока.

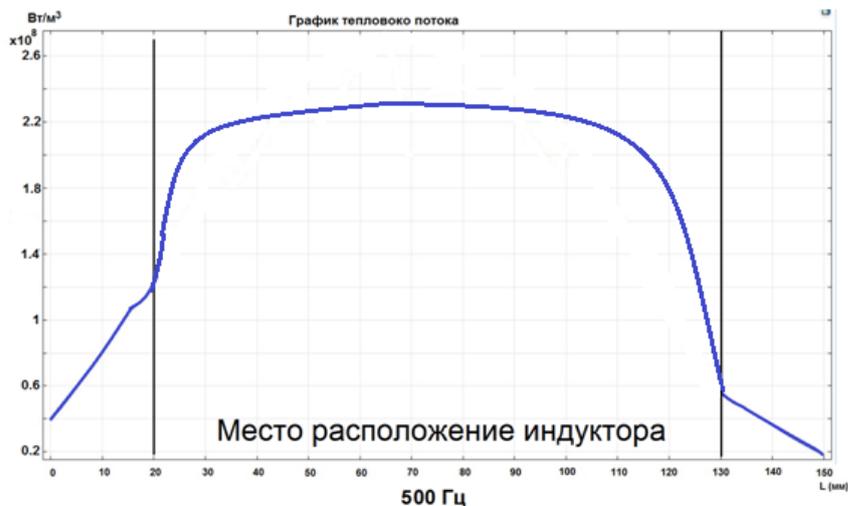


Рис 4.24. Распределения объемной мощности для установки при частоте 500 Гц

На рис. 4.25. представлена картина распределения температуры в системе индуктор – труба – нефть.

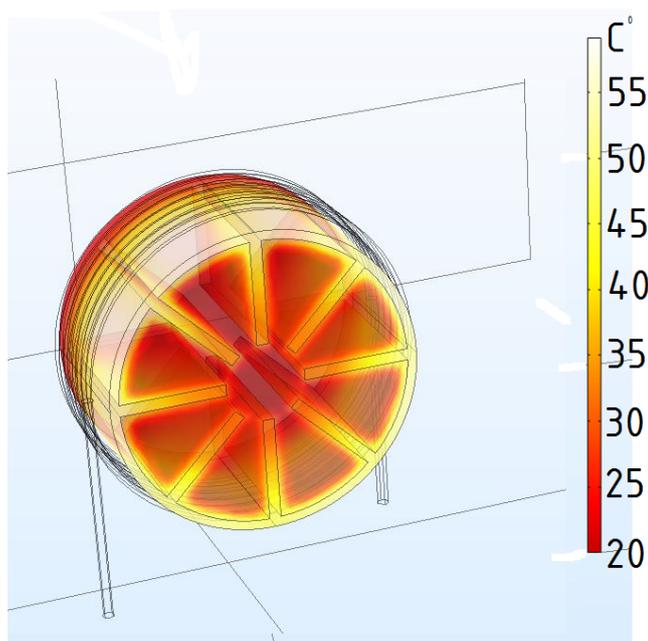


Рис. 4.25. Температурное распределение в системе «индуктор – труба – жидкость» при частоте 500 Гц

На рис. 4.26 приведен график температурного распределения в потоке нефти в промежутке между ребрами на участке индуктора длиной 0,15м от входа к выходу установки. Расстояние между ребрами на расстоянии 0,04м от внутренней поверхности трубы составляет 0,046м. Очевидно, что для

интенсификации нагрева и сокращения длины нагревателя необходимо увеличивать число ребер. Как следствие, это приведет к увеличению мощности на единицу длины нагревателя. Количество ребер определяется исходя из накладываемых на процесс нагрева технологических ограничений на температуру пограничного слоя нефти.

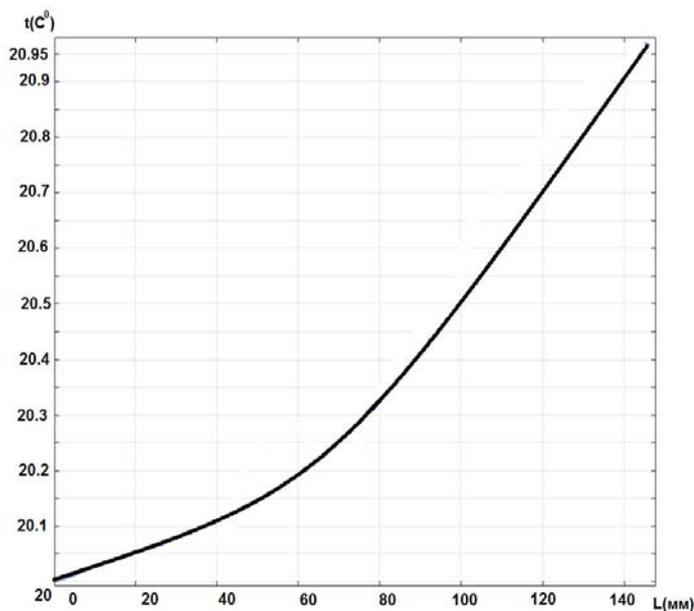


Рис. 4.26. Температурное распределение в потоке нефти между ребрами на участке индуктора длиной 0,15 м

Используя полученные для короткой системы результаты с учетом изменяющихся условий теплообмена при увеличении температуры по длине реального нагревателя, рассчитаны температурные распределения в различных продольных сечениях для секции нагревателя длиной 0,9 м.

На рис. 4.28 приведен график распределения температуры на поверхности ребра на расстоянии 0,046 м от внутренней поверхности ребра. Число ребер увеличено в 1,5 раза. На рис. 4.29 приведен график распределения температуры на внутренней поверхности стенки трубы по длине нагревателя.

Как следует из результатов расчета, применение нагревателя с внутренним оребрением трубы существенно повышает интенсивность нагрева и позволяет сократить общую длину нагревателя.

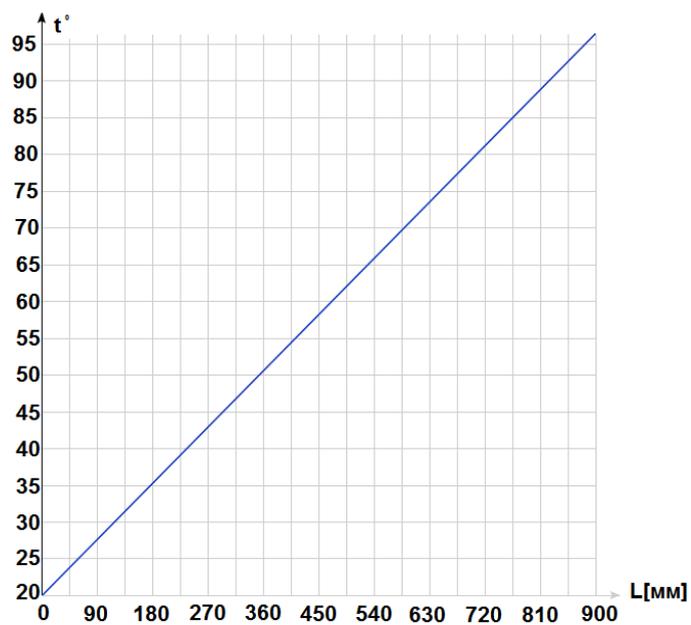


Рис. 4.28. Температурное распределение на поверхности ребрана расстоянии 0,046м от внутренней поверхности ребра

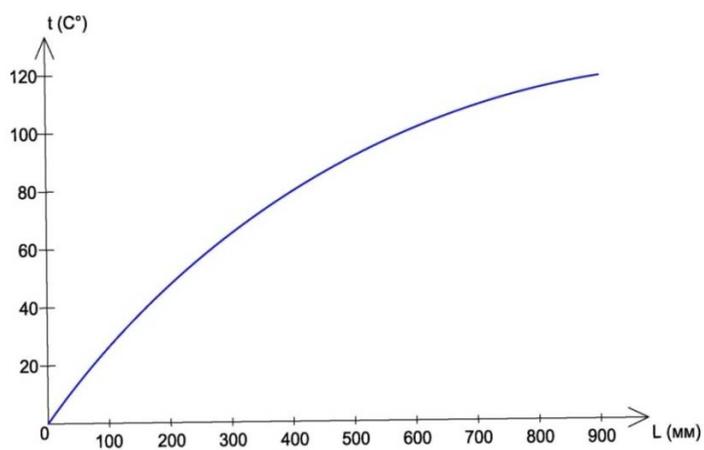


Рис. 4.29. Температурное распределение на внутренней поверхности стенки оребренной трубы по длине нагревателя

4.3. Исследование термогидравлических процессов

На рис 4.30 представлена модель с сеткой конечных элементов для решения термогидравлической задачи.

В результате решения электромагнитной задачи получены исходные данные в виде распределения плотности тока в трубе и мощности внутреннего тепловыделения для решения термогидравлической задачи.

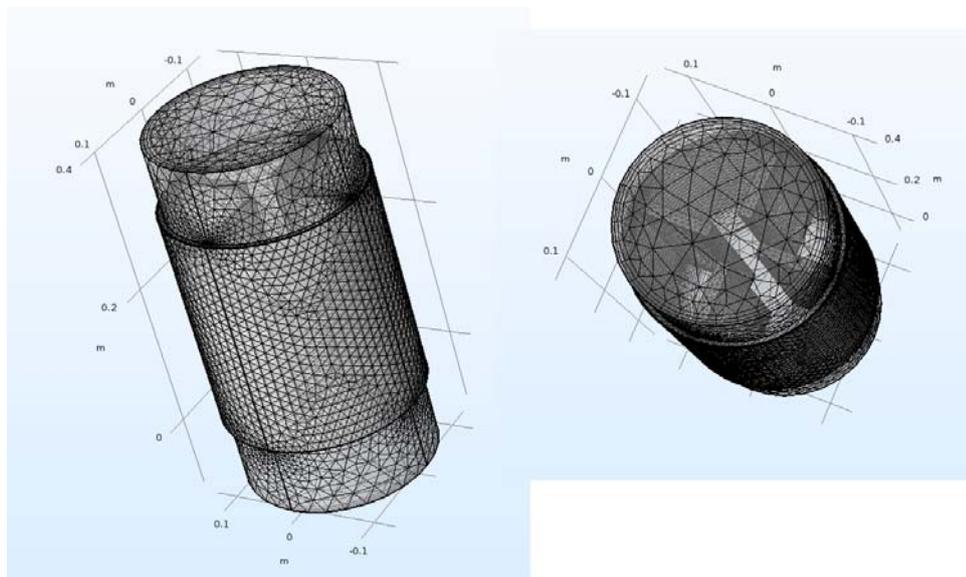


Рис. 4.30. Сетка конечных элементов для решения термогидравлической задачи

Задача рассматривалась для упрощенной конструкции индукционного нагревателя с уменьшенным количеством ребер (четыре ребра) и одновитковым индуктором. Сетка конечных элементов состоит из 105316 элементов, для решения использовался ПК с объемом оперативной памяти 8192 Мб. Результаты моделирования стационарного температурного режима представлены на рис. 4.31, рис. 4.32. Как следует из результатов моделирования, максимальная температура трубы достигается примерно на расстоянии $1/3$ от выхода из индуктора. На выходе из индуктора температура жидкости в области ребер выше, чем в любой другой точке на таком же расстоянии от центра потока, что подтверждает вывод об эффективном использовании ребер для интенсификации теплообмена.

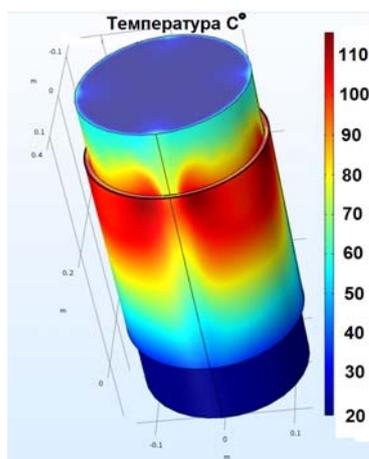


Рис. 4.31. Графики распределения температуры

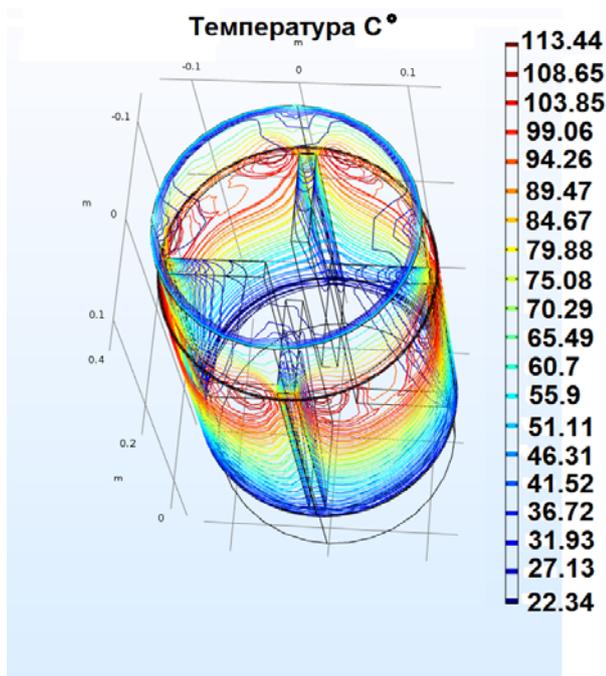


Рис. 4.32. Графики распределения температурных полей

На рис.4.33 и рис.4.34 представлены результаты решения гидравлической задачи в виде распределения скорости потока по сечению от входа в нагреватель до выхода из него. Наличие ребер приводит к увеличению скорости потока внутри нагревателя по сравнению со скоростью на входе в нагреватель, что отражается на температурном распределении в потоке жидкости.

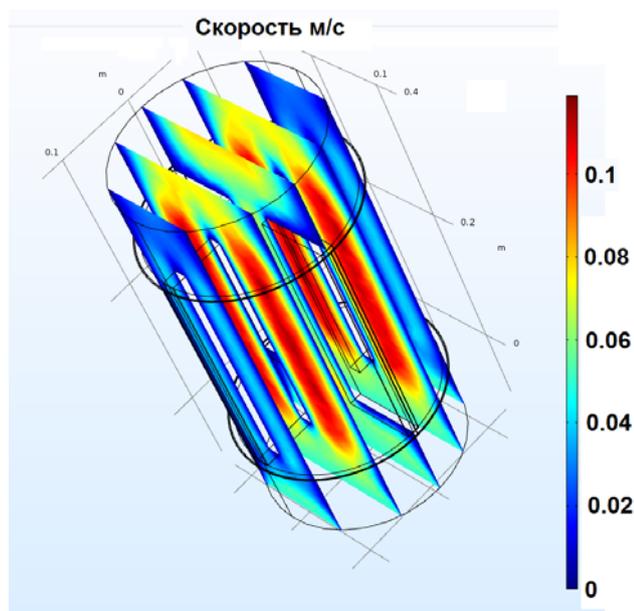


Рис. 4.33. Распределение скорости потока по сечению

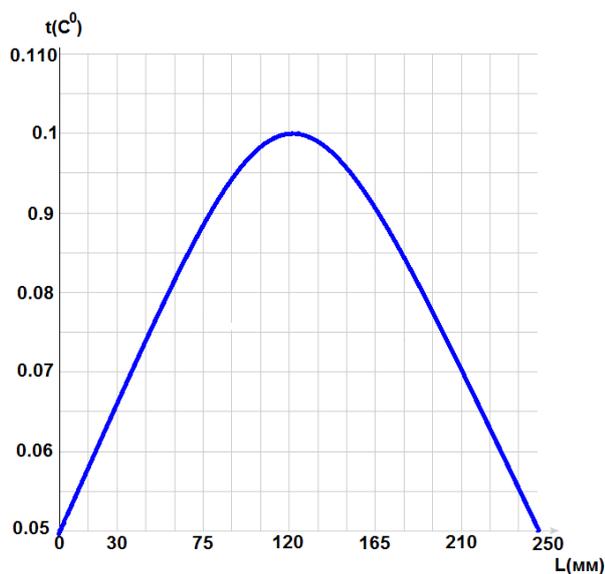


Рис. 4.34. Графики распределения скорости потока на выходе из нагревателя

Выводы

– С помощью конечно –элементной модели электромагнитного поля в системе «индуктор– труба», проведены расчеты и выполнен анализ распределения мощности электромагнитных источников тепла.

– Выполнен анализ характеристик объекта при нагреве на различных частотах. Показано, что оптимальная частота, обеспечивающая

максимальный коэффициент полезного действия для данного типа нагревателя, составляет 500Гц.

– С помощью разработанного алгоритма решения тепловой задачи выполнен анализ температурных полей и даны рекомендации по выбору рациональной конструкции нагревателя, ориентированной на нагрев вязких жидкостей.

– Показано, что предлагаемая конструкция нагревателя с одной ребренной трубой позволяет повысить коэффициент мощности нагревателя и снизить массогабаритные характеристики по сравнению с нагревателем с осесимметричными трубами.

– На основании результатов расчета гидравлических и тепловых полей с использованием трехмерной модели получены зависимости распределения скорости жидкости по сечению потока и температурного распределения в системе «ребренная труба–поток жидкости». Показано увеличение интенсивности теплообмена за счет применения ребер во внутренней полости трубы.

5. ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИНЫ МНОГОСЕКЦИОННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

Для стационарного процесса непрерывного косвенного индукционного нагрева жидкости актуальной является задача минимизации длины нагревателя, решение которой существенно повышает технико – экономические показатели процесса.

При отсутствии технологических ограничений на температуруиндукционный нагреватель позволяет создать высокий уровень удельной поверхностной мощности, что обеспечило бы минимальную длину нагревательной системы. Однако, в реальной ситуации на максимальную температуру пограничного слоя жидкости наложены ограничения, обусловленные реологическими свойствами нефти. Это обстоятельство приводит к необходимости поддерживать температуру стенки трубы в процессе нагрева на определенном уровне, который значительно ниже значений, предоставляемых физическими возможностями индукционных нагревателей. По этой причине в реальной ситуации коэффициент теплообмена между тепловыделяющей поверхностью трубы и жидкостью изменяется в широких пределах $(30 \div 100) \frac{Вт}{м^2 \cdot град}$. Его величина определяется разностью температур стенки трубы и пограничного слоя нагреваемой жидкости. Очевидно, что этот предельный уровень температуры трубы соответствует случаю максимальной производительности трубопровода. Так как между температурным распределением по сечению потока жидкости в установившемся режиме и температурой стенки трубы имеется однозначная зависимость, температура трубы при постоянной длине нагревателя должна быть снижена при уменьшении производительности установки.

5.1. Структура индукционного нагревательного комплекса

Для технологических линий высокой производительности уменьшение длины нагревателя решается за счет применения специальных смесителей, встроенных в нагревательную систему.

На рис.5.1 показана схема индукционного нагревательного комплекса, включающего чередующиеся участки нагрева в индукторе соленоидального типа и участки с трехфазным индуктором для перемешивания и нагрева жидкости.

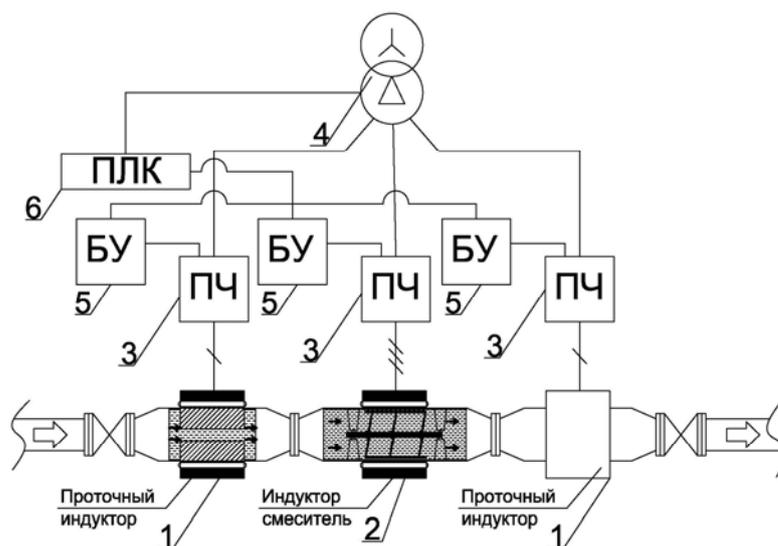


Рис. 5.1. Схема нагревательного комплекса с последовательным соединением нагревательных секций и трехфазным смесителем 1 –Проточной индуктор, 2 –Индуктор смеситель, 3 –Преобразователь частоты, 4 –Трансформаторная подстанция, 5 –Блок управления, 6 – Программируемый логический контроллер

Многосекционный индукционный нагреватель в зависимости от производительности трубопровода может состоять из нескольких таких автономных групп, содержащих последовательно соединенные соленоидальный индуктор и трехфазный индуктор –смеситель. На выходе из индуктора –смесителя температура жидкости по сечению потока в результате перемешивания принимает значение, соответствующее её средней температуре. На вход последующей группы жидкость поступает с

одинаковой по сечению потока температурой, равной среднему значению на выходе из предыдущей группы.

На рис. 5.2 приведены графики температур в различных точках по сечению потока жидкости в индукционном нагревателе и на выходе из смесителя.

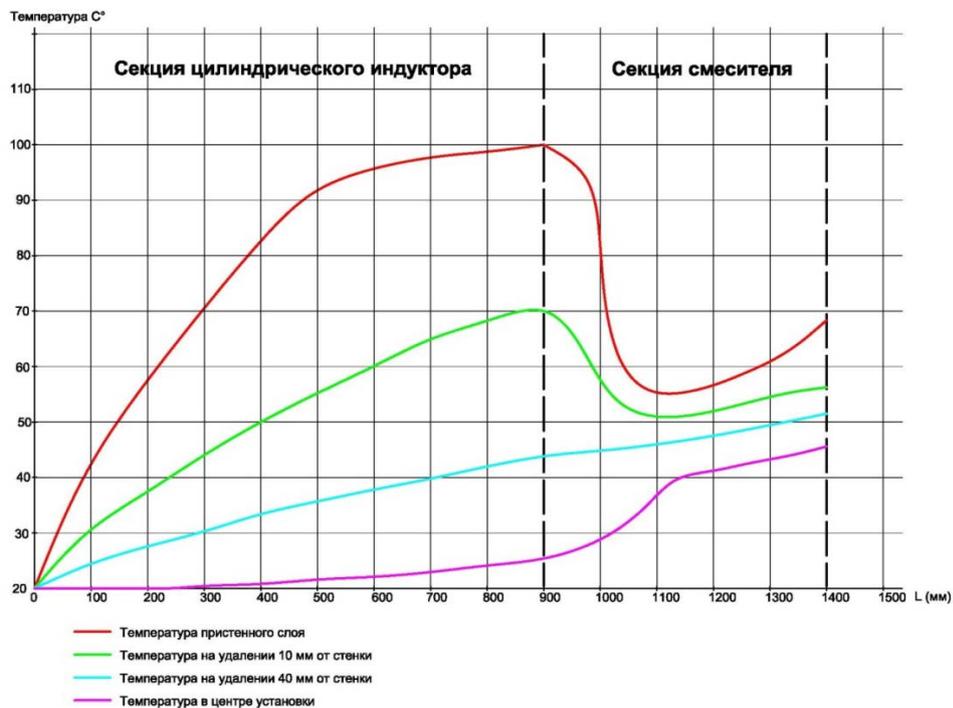


Рис. 5.2. Изменение температуры в различных слоях жидкости

На рис.5.3 приведен график температуры внутренней поверхности трубы.

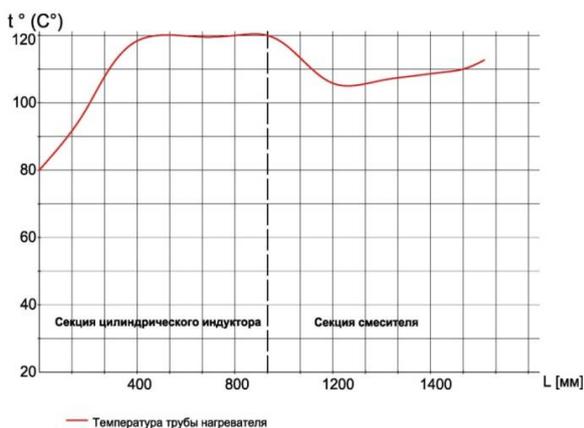


Рис. 5.3. Распределение температуры на внутренней стенке трубы

Таким образом, каждую группу можно рассматривать как независимый нагреватель, отличающийся от предыдущего температурой жидкости на входе, коэффициентом теплообмена между трубой и жидкостью, вязкостью и уровнем мощности нагревателя.

Математическая модель процесса нагрева в каждой группе может быть представлена системой взаимосвязанных уравнений следующего вида:

для цилиндрического нагревателя

$$\frac{\partial(\mu_a(H(r,x,t),T)H(r,x,t))}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{1}{\sigma(t)} \left(\frac{\partial H(r,x,t)}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sigma(t)} \frac{\partial H(r,x,t)}{\partial x} \right) = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial H(r, x, t)}{\partial r} = 0; H(R, L, t) = u(\tau)f(H, t)$$

$$; \quad (5.2)$$

Теплообмен между тепловыделяющей стенкой трубы и жидкостью описывается уравнением конвективного теплообмена

$$-\lambda \frac{\partial T(r,x,\tau)}{\partial r} \Big|_{r=R} = a[T(R, x, \tau) - T(R, x, \tau)] \quad (5.3)$$

Температура жидкости на входе в нагреватель первой группы для установившегося режима

$$T_1(r, 0, \tau) = T_{10} = \text{const} \quad (5.4)$$

Температура жидкости на входе в нагреватель каждой последующей группы после смесителя

где $T(r)$ – температурное распределение по сечению потока жидкости на выходе из предыдущего нагревателя, S – площадь сечения потока.

Система уравнений, описывающая процесс теплообмена в трехфазном индукторе –смесителе, приведена в разделе 2.

5.2. Постановка и решение задачи оптимального проектирования

Задача на минимум длины многосекционного нагревателя формулируется следующим образом.

Для объекта, описываемого системой уравнений (2.5÷2.8), (5.1÷5.5), требуется найти в классе кусочно–постоянных функций стесненное ограничением вида

$$(5.6)$$

распределение мощности $P_{\text{опт}}(x)$, обеспечивающее минимальную длину L нагревателя при заданной по технологии температуре жидкости в выходном сечении ($x=L$) нагревателя с допустимым отклонением ΔT от заданного значения

$$\max |T_{\text{ср}}(L) - T_{\text{зад}}(L)| \leq \Delta T \quad (5.7)$$

Здесь $P(x)$ – удельная поверхностная мощность нагревателя, зависящая от пространственной координаты x , $P_{\text{max}}(x)$ – максимальное значение удельной поверхностной мощности, $T_{\text{зад}}(L)$ – требуемая по технологии температура потока в выходном сечении нагревателя. На температуру тепловыделяющей поверхности накладывается ограничение, обусловленное предельно допустимой температурой пограничного слоя нагреваемой жидкости

$$T_{\text{ст}}(r, x, \tau) \leq T_{\text{max}} \quad (5.8)$$

Как показано в работе [50], оптимальный алгоритм, обеспечивающий выполнение требования (5.7), представляет собой кусочно–постоянную функцию. Таким образом, задача сводится к определению количества и мощности секций нагревателя. Исходя из физических соображений на первом участке мощность первой секции должна быть максимальной, ограниченной лишь предельно допустимым значением температуры стенки трубы.

Определим количество и мощность каждой секции, считая длину всех нагревательных секций одинаковой. Существенным отличием процедуры поиска оптимального алгоритма распределения мощности по секциям является наличие участков перемешивания с трехфазным индуктором, мощность которых делится на два потока: на создание вращающего момента и на нагрев жидкости [124, 125, 126]. Расчет усложняется ещё одним обстоятельством: в зависимости от вязкости жидкости и производительности трубопровода распределение мощности между этими двумя потоками изменяется, поэтому в алгоритм расчета оптимальной длины необходимо встроить дополнительную подпрограмму расчета мощности смесителя.

Поиск ведется относительно двух неизвестных: количества секций и мощности каждой секции. На основании проведенного в работе анализа для нагревателя с заданной производительностью 90 т/сут. минимальная длина индуктора, обеспечивающая согласование с электрической сетью напряжением 380/220В составляет 0,9м, а длина секции смесителя составляет 0,5 м. Эта длина и принята в дальнейших расчетах в качестве дополнительного условия при расчетах оптимального распределения мощности и общей длины нагревателя.

Исходные данные для расчета приведены в таблицах 3.1, 4.1.

Алгоритм расчета представлен на рис. 5.4.

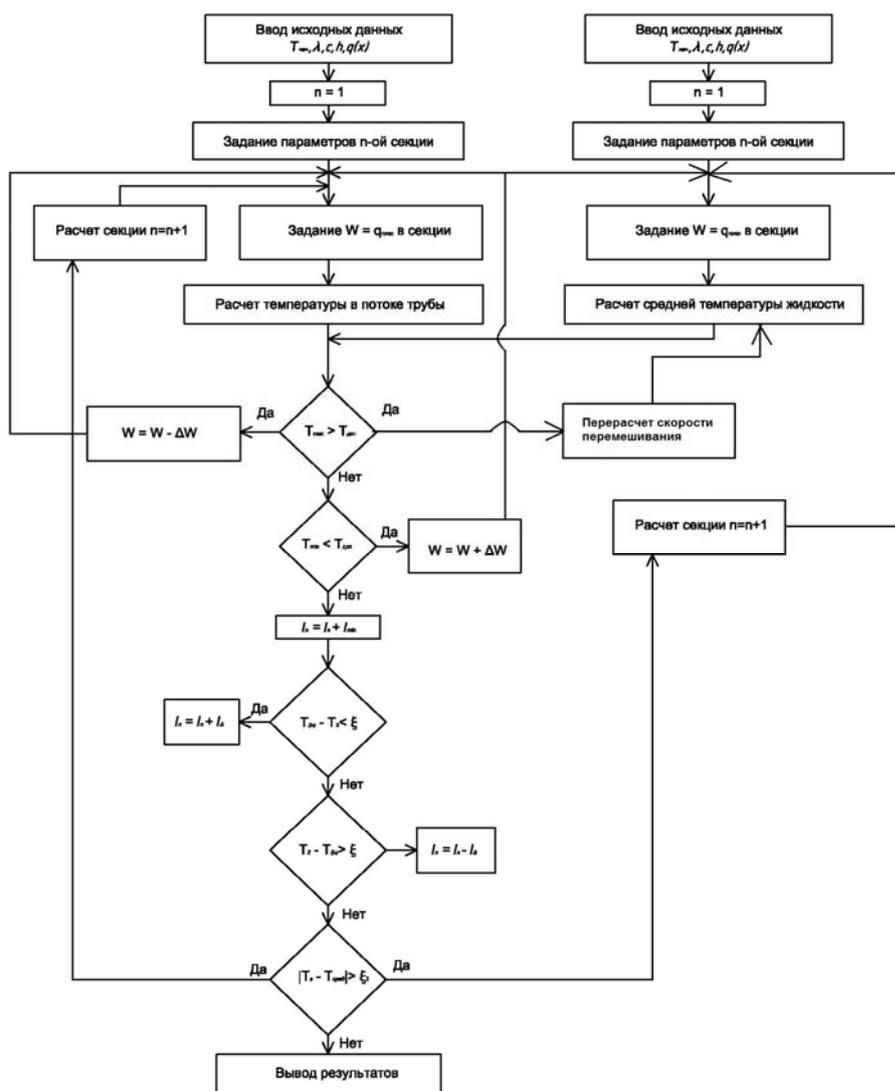


Рис. 5.4. Алгоритм расчета оптимального распределения мощности

Результаты расчета оптимальных по критерию минимума общей длины нагревательного комплекса параметров индукционной системы для заданной производительности приведены в табл. 5.1.

На рис.5.5 представлен оптимальный график распределения мощности по длине многосекционной нагревательной системы. График состоит из трех участков: первый участок соответствует длине нагревательной секции, второй участок с нулевым значением мощности соответствуют длине участка перемешивания, третий участок соответствует длине трехфазного индуктора.

Номер расчета	объемная мощность тепловыделения	объем трубы	Мощность по всей длине	Длина секции	Начальная температура	Конечная Температура в пристенном слое	Конечная Температура в центре
	Q[Вт х м3]	V [м3]	P[ВА]	L[м]	С°	С°	С°
Секция цилиндрический индуктор №1	2,4x106	0,0233	41600	0,9	0	70	0
Секция смеситель №1	2x107	0,0025	33800	0,5	–	25	20
Секция цилиндрический индуктор №2	2,4x106	0,0233	32000	0,9	22,5	80	23
Секция смеситель №2	2x107	0,0025	30520	0,5	–	40	37
Секция цилиндрический индуктор №3	2,4x106	0,0233	26000	0,9	38,5	90	39
Секция смеситель №3	2x107	0,0025	27800	0,5	–	67	65
Секция цилиндрический индуктор №4	2,4x106	0,0233	23000	0,9	66	100	67
Секция смеситель №4	2x107	0,0025	26300	0,5	–	76	75
Сумма			241020	5,6			

На участке активного перемешивания жидкости мощность нагрева равна нулю, так как этот участок находится за пределами трехфазного индуктора. Уменьшение мощности нагревательных секций при перемещении нагреваемой нефти к выходу обусловлено повышением температуры нефти и, как следствие, снижением коэффициента теплоотдачи. Мощность секций с трехфазным индуктором незначительно повышается из –за увеличения коэффициента теплоотдачи за счет снижения температуры пограничного слоя нефти после смесителя.

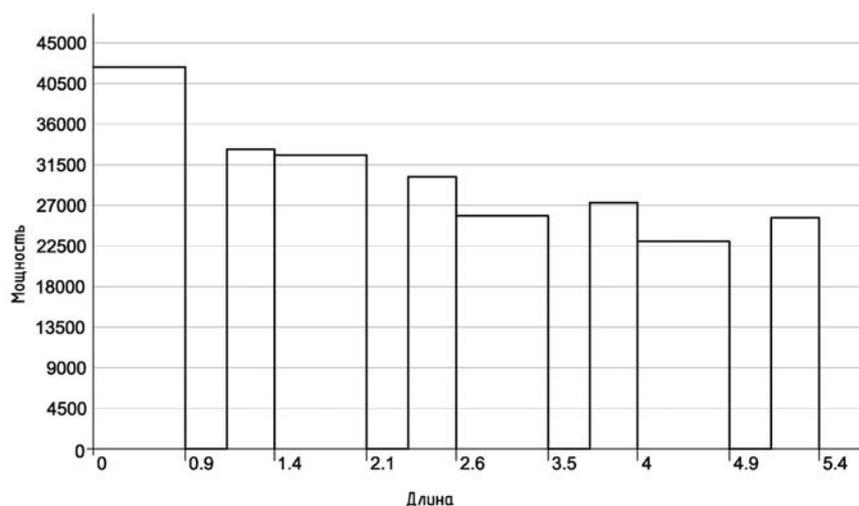


Рис. 5.5. Оптимальное распределение мощности по длине многосекционного нагревателя

На рис.5.6 приведен график распределения температуры по длине многосекционного нагревателя при оптимальном распределении мощности с учетом смесителя. Здесь график 1 – температура внутренней стенки трубы, график 2 – средняя температура по сечению потока нефти.

На рис. 5.7 приведен график распределения температуры по длине многосекционного нагревателя при оптимальном распределении мощности с учетом условных секций перемешивания без подогрева (пассивное перемешивание). Исходные параметры многосекционного нагревателя для сравнительного анализа приняты такими же, как в разделе 3, 4, т.е. соответствуют параметрам исследуемого в данном разделе многосекционного нагревателя. Здесь график 1 – температура внутренней стенки трубы, график 2 – средняя температура по сечению потока нефти.

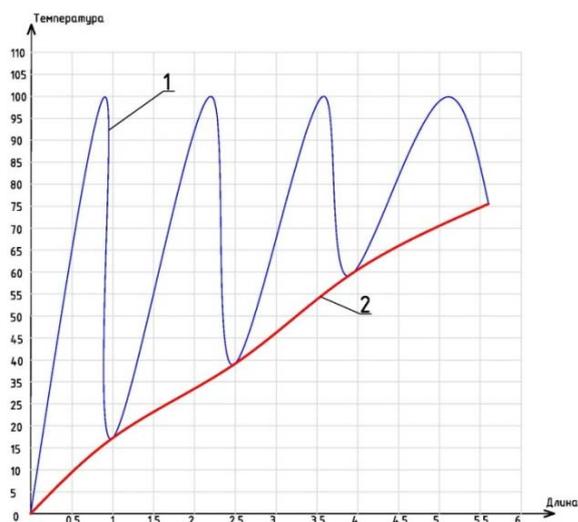


Рис. 5.6. Распределение температуры по длине нагревателя при оптимальном распределении мощности по секциям
 где 1 – температура внутренней стенки трубы, 2 – средняя температура жидкости.

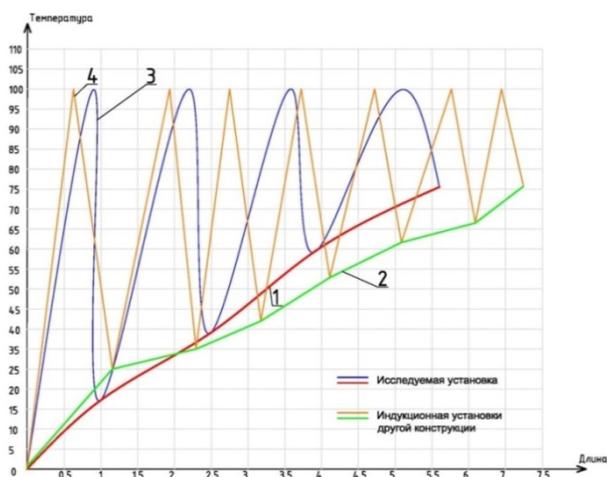


Рис. 5.7. Распределение температуры по длине нагревателей при оптимальном распределении мощности по секциям
 1,3 – Температурное распределение многосекционного нагревателя;
 2,4 – Температурное распределение многосекционного нагревателя с пассивным смесителем.

Как следует из результатов расчета, в предложенной установке с использованием трехфазного индукционного индуктора нагрев до заданной температуры достигается быстрее, длина индукционной системы уменьшается примерно на 30%.

Выводы

– Сформулирована задача оптимального распределения мощности в многосекционной нагревательной системе по критерию минимальной длины нагревателя.

– Разработана методика расчета оптимальных параметров многосекционного нагревателя с учетом ограничений на мощность нагрева и на температуру поверхностного слоя жидкости.

– Для обеспечения условий электромагнитной совместимости с питающей сетью предложена фиксированная длина нагревательных секций, позволяющая использовать стандартные напряжения источников питания без согласующих трансформаторов.

Получены оптимальные алгоритмы распределения мощности нагрева с учетом постоянной длины секций нагревательного комплекса, обеспечивающие минимальную длину многосекционного нагревательного комплекса.

6. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ

Система управления индукционным нагревательным комплексом должна обеспечивать требуемый по технологии температурный режим при наличии внешних возмущений. Как отмечено в разделе 5, индукционный нагревательный комплекс состоит из нескольких групп, содержащих последовательно соединенные однофазный индуктор для нагрева жидкости и трехфазный индуктор –смеситель [110, 111, 114, 116, 121, 122]. Каждую группу можно рассматривать как независимый нагреватель, отличающийся от предыдущего температурой жидкости на входе, коэффициентом теплообмена между трубой и жидкостью, вязкостью и уровнем мощности нагревателя. Функциональная схема нагревательного комплекса с системами регулирования для каждой автономной секции представлена на рис. 6.1.

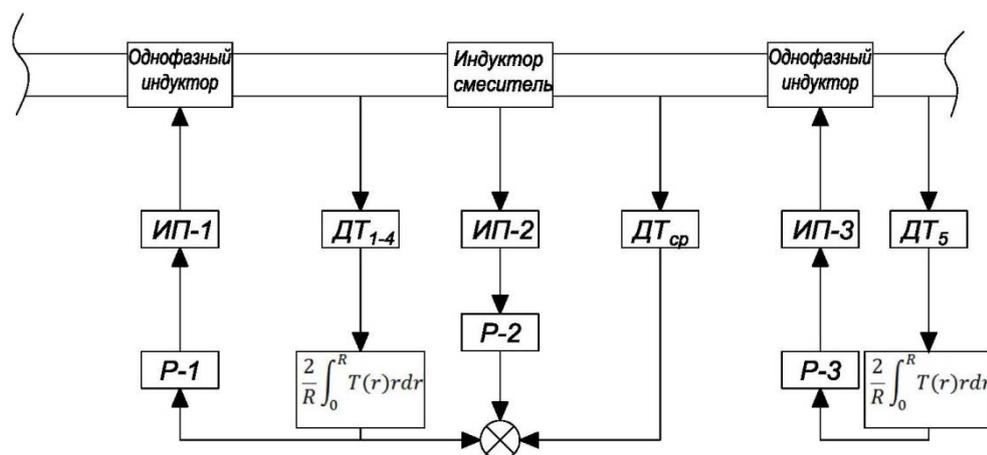


Рис. 6.1. Функциональная схема нагревательного комплекса с системами регулирования для каждой автономной секции

В стационарном режиме температурное распределение по сечению потока жидкости однозначно связано с средней по сечению потока температурой жидкости, поэтому система регулирования однофазным индукционным нагревателем реализуется как система стабилизации с обратной связью по средней температуре. Для ограничения мощности нагревателя при достижении температурой трубы максимально допустимого

значения используется датчик температуры, установленный на поверхности трубы, контактирующей с жидкостью.

Основной задачей системы управления индуктором–смесителем является обеспечение средней по сечению потока жидкости температуры. 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, представленную на рис. 6.2. Графики 1 и 2 соответствуют различным значениям вязкости и температуры нагреваемой жидкости.

Для поиска оптимальной частоты вращения используется следящая система, в которой задающий сигнал формируется с помощью интегрирующего устройства по информации о температурном распределении по сечению потока на входе в смеситель.

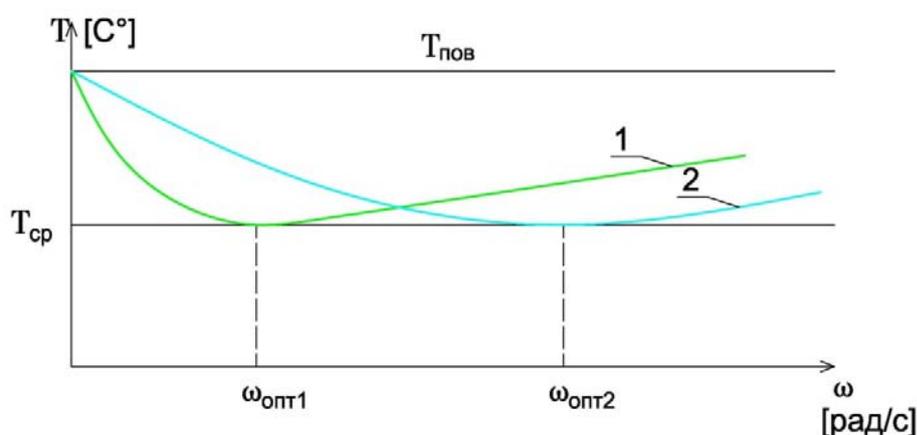


Рис. 6.2. Зависимость оптимальной частоты вращения смесителя от вязкости и температуры

6.1. Передаточная функция объекта управления

Исследуемый технологический процесс относится к объектам с распределенными параметрами.

Особенностью синтеза систем управления индукционными нагревателями является ограниченная доступность наблюдения и измерения

температуры по сечению нагреваемого потока жидкости. Формирование сигнала обратной связи в системах с распределенными параметрами возможно лишь по результатам измерения температуры в ограниченных точках. Как было отмечено выше, достаточным для оценки температурного распределения и реализации систем управления оказывается измерение температуры в четырех выбранных определенным образом точках по сечению потока.

Возмущающие воздействия на объект в процессе нагрева – вариации различных энергетических, технологических и других параметров всего комплекса оборудования, обеспечивающего процесс косвенного индукционного нагрева жидкости, около своих номинальных значений, – могут достигать значительной величины. К таким возмущающим воздействиям относятся: колебания напряжения сети ($(+10 \div -15)\%$ от $U_{ном}$), изменение скорости потока жидкости через теплообменник вследствие нестабильности работы компрессорной установки, изменения физических свойств перекачиваемой жидкости, вариации температуры жидкости на входе в нагреватель, изменения условий теплообмена между жидкостью и стенкой трубы, колебаний температуры окружающей среды.

Как было отмечено ранее, нагрев жидкости в индукционном нагревателе непрерывного действия характеризуется неравномерным температурным распределением как по сечению потока, так и по длине нагревателя. Для оценки динамических свойств объекта необходимо определить его передаточную функцию. Исходя из физической сущности рассматриваемой задачи для описания динамических свойств объекта используется линейная модель процесса с учетом ряда общепринятых допущений, позволивших получить удовлетворительную точность описания динамических свойств с помощью аналитических методов:

1. Электромагнитные процессы принимаются безинерционными.

2. Физические характеристики нагреваемой жидкости для каждого интервала постоянства нагрева остаются неизменными, изменяясь лишь при изменении производительности установки или реологических свойств жидкости.

3. Постоянная времени стенки трубы на порядок меньше тепловой постоянной времени потока жидкости, поэтому при определении передаточной функции её можно считать безинерционным звеном.

4. Источники тепла можно представить в форме теплового потока с поверхности трубы.

С учетом принятых допущений математическая модель процесса косвенногоиндукционного нагрева потока жидкости может быть представлена в виде

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

Г.У.:

$$\left. \begin{aligned} +\lambda \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} &= q(x, t), r \in [0, R], x \in [0, \infty]; \\ T(r, 0, t) &= T(r, t) \\ \frac{\partial T(0, x, t)}{\partial r} &= 0; \text{ (условие симметрии);} \end{aligned} \right\}$$

Н.У.:

$$[T(r, x, 0) = 0], \text{ если в приращениях.}$$

Рассматривая процесс нагрева в малом, граничные и начальные условия можно представить в форме:

$$-\lambda \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} = \Delta q(x, t);$$

$$T(r, 0, t) = 0;$$

$$T(r, x, 0) = 0;$$

$$\frac{\partial T(r, x, t)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0.$$

Применяя последовательно интегральное преобразование Лапласа по времени конечное интегральное преобразование Ханкеля по радиусу, и опуская промежуточные преобразования, получим операторное выражение для температуры в виде:

$$\tilde{T}(r, x, p) = \frac{2ae^{-\frac{P}{V}x}}{\lambda RV} \int_0^x \Delta \tilde{q}(v, p) e^{\frac{P}{V}v} dv +$$

Введем обозначение $\mu_n = S_n R (S_n = \frac{\mu_n}{R})$, запишем

$$T(r, x, p) = \frac{2ae^{-\frac{P}{V}x}}{\lambda RV} \int_0^x \Delta \tilde{q}(v, p) e^{\frac{P}{V}v} dv +$$

;

Найдем передаточную функцию для температуры относительно теплового потока.

Получим окончательно

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

$$\text{, где } T_n = \frac{R^2}{a \mu_n^2}; T_0 = \frac{R^2}{a}; K_0 = \frac{2R}{\lambda};$$

Структурная схема объекта управления представлена на рис. 6.3.

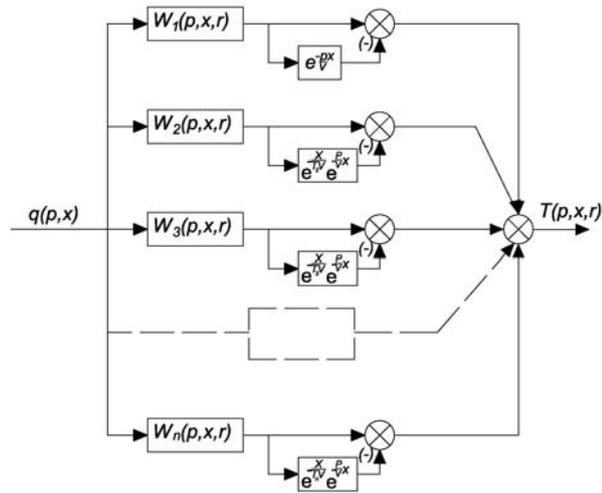


Рис. 6.3. Структурная схема объекта управления

Она состоит из параллельного соединения интегрирующего звена с транспортным запаздыванием и бесконечной суммы аperiodических звеньев с транспортным запаздыванием с убывающими по мере возрастания n постоянными времени $\frac{R^2}{a\mu_n^2}$.

Здесь $W_1(p, r, x) = \frac{K_0}{T_0 p}$ — передаточная функция интегрирующего звена по каналу «тепловой поток–средняя температура»,

$$W_2(p, r, x) = \frac{2R}{\lambda\mu_1^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_1 \frac{r}{R})}{J_0(\mu_1)(T_1 p + 1)}; W_3(p, r, x) = \frac{2R}{\lambda\mu_2^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_2 \frac{r}{R})}{J_0(\mu_2)(T_2 p + 1)};$$

$$W_n(p, r, x) = \frac{2R}{\lambda\mu_n^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_n \frac{r}{R})}{J_0(\mu_n)(T_n p + 1)}; \quad - \text{ передаточные функции } n\text{-ого}$$

члена ряда.

В физически реализуемой системе управления в качестве управляемой величины обычно рассматривается температура в какой-либо фиксированной точке, доступной для контроля. Для индукционного нагревателя вязкой жидкости при ламинарном характере течения одной фиксированной точки для оценки температурного распределения по сечению оказывается недостаточно. Достаточную точность можно получить с помощью системы с обратной связью по средней температуре в выходном

сечении потока жидкости. Количество точек измерения для оценки средней температуры зависит от требуемой точности приближения расчетной средней температуры к её фактическому значению. Как показывают эксперименты, для практических задач достаточно измерять температуру в четырех установленных на определенном расстоянии точках.

6.2. Реализация системы автоматического управления нагревом

Установим связь между температурным распределением по сечению потока и средней температурой.

Экспериментально установлено, что для рассматриваемой ситуации перепад температур по радиальной координате в выходном сечении потока жидкости в стационарном режиме составляет 65 град., средняя температура – 42 град. (рис. 6.4).

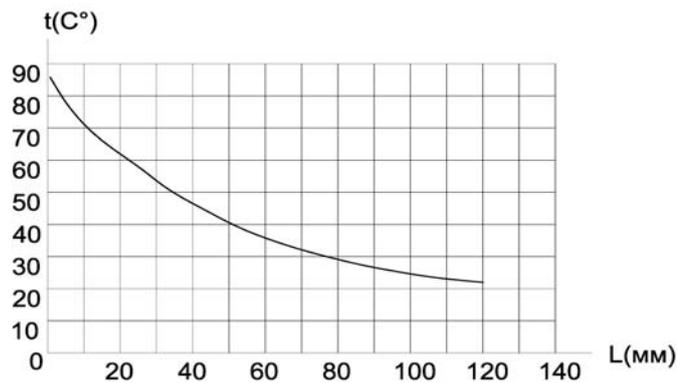


Рис. 6.4. Температурное распределение по сечению потока на выходе из нагревателя

Средняя по сечению температура потока жидкости определяется по формуле:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{S} \int_0^R 2\pi T(r)rdr = \frac{2}{R} \int_0^R T(r)rdr \quad (6.1)$$

Распределение температуры по радиусу аппроксимируется кусочно – линейной функцией, состоящей из отрезков прямых с концами в точках измерения температуры:

$$T(r) = \begin{cases} a_1 r + b_1, & \text{при } R_{11} \leq r < R_{12} \\ a_2 r + b_2, & \text{при } R_{12} \leq r < R_{13} \\ \dots \\ a_i r + b_i, & \text{при } R_{1i} \leq r < R_{1(i+1)} \\ \dots \\ a_{N-1} r + b_{N-1}, & \text{при } R_{1(N-1)} \leq r \leq R_{1N} \end{cases} ; \quad i = \overline{1, (N-1)}$$

где N – количество точек измерения температуры по радиусу потока.

Коэффициенты a_i и b_i определяются из выражений

$$a_i = \frac{T(R_{1(i+1)}) - T(R_{1i})}{R_{1(i+1)} - R_{1i}}; \quad b_i = T(R_{1i}) - a_i R_{1i}$$

Подставив выражение для функции распределения температуры в формулу (6.1) после выполнения интегрирования получаем:

$$\begin{aligned} T_{cp} &= \frac{2}{R_{1N}^2 - R_{11}^2} \sum_{i=1}^{N-1} \int_{R_{1i}}^{R_{1(i+1)}} (a_i r + b_i) r dr = \\ &= \frac{2}{R_{1N}^2 - R_{11}^2} \sum_{i=1}^{N-1} \left[a_i \frac{R_{1(i+1)}^3 - R_{1i}^3}{3} + b_i \frac{R_{1(i+1)}^2 - R_{1i}^2}{2} \right] \end{aligned}$$

Окончательное выражение для средней температуры получаем в виде:

$$+ T(R_{1i}) \frac{R_{1(i+1)}^2 - R_{1i}^2}{2} - \left(T(R_{1(i+1)}) - T(R_{1i}) \right) \frac{R_{1(i+1)}^2 + R_{1i}^2}{2} R_{1i}$$

Расчет средней температуры в реальном масштабе времени в системе автоматического управления реализован в специальном вычислительном блоке $W_{cp}(p)$.

Структурная схема замкнутой системы с обратной связью по средней температуре жидкости представлена на рис. 6.5.

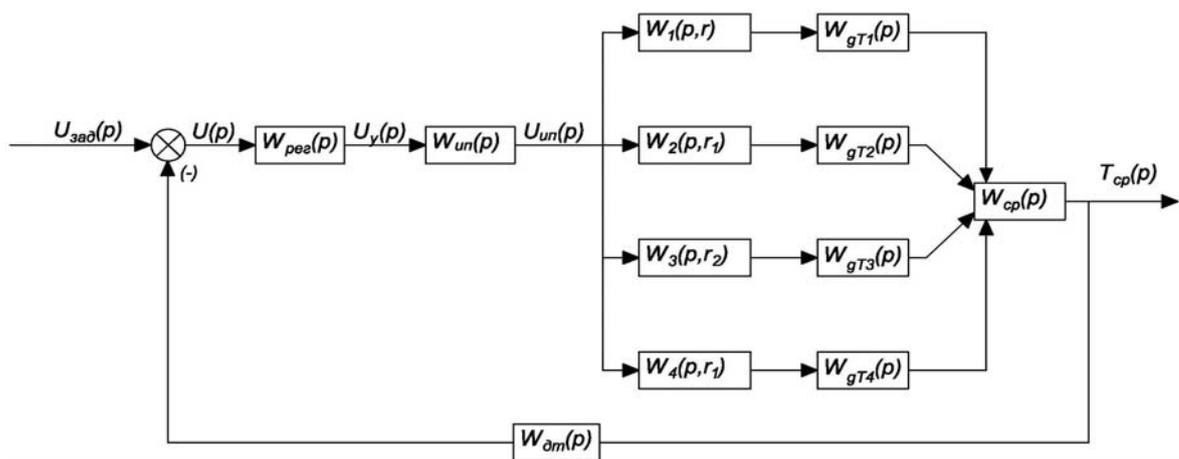


Рис 6.5. Структурная схема системы управления индукционным нагревателем

Здесь $W_{рег}(p)$ – передаточная функция регулятора; $W_{ун}(p)$ – передаточная функция источника питания; $W_i(p, r)$ – передаточная функция динамического звена для координаты пограничного слоя жидкости в выходном сечении нагревателя, $W_2(p, r_1)$ – передаточная функция динамического звена для координаты пограничного слоя жидкости в выходном сечении нагревателя, $W_3(p, r_2)$ – динамического звена для координаты пограничного слоя жидкости в выходном сечении нагревателя, $W_{ом1}(p)$ – $W_{омn}(p)$ – передаточные функции датчиков температуры, установленных в соответствующих точках измерения.

Исследование динамических свойств физически реализуемой замкнутой системы регулирования можно выполнить известными методами теории автоматического регулирования.

6.4. Система управления индукционным устройством для перемешивания жидкости

Основной задачей автоматической системы управления процессом перемешивания является получение одинаковой по всему сечению потока температуры, равной средней температуре в выходном сечении потока. Трехфазный индуктор – смеситель применяется в комплексе с традиционным

однофазным индукционным нагревателем, в полости которого располагается труба с нагреваемой жидкостью. Регулирование режима работы индуктора – смесителя осуществляется с помощью следящей системы.

Функциональная схема системы управления представлена на рис. 6.6.

В качестве источника питания трехфазного индуктора используется преобразователь частоты; управление режимом работы индуктора осуществляется с помощью следящей системы, которая формирует сигнал управления на основании сравнения средней температуры по сечению потока жидкости на выходе из нагревателя и температуры на выходе из смесителя.

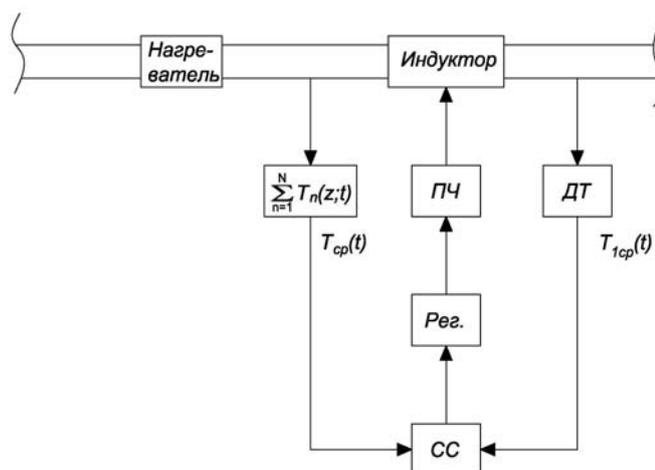


Рис. 6.6. Функциональная схема следящей системы

Эффективность перемешивания потока жидкости зависит от частоты вращения ротора –смесителя. В предлагаемой системе частота вращения регулируется с помощью преобразователя частоты, подключенного к трехфазному индуктору –смесителю. Для эффективного перемешивания необходимо на вход преобразователя частоты формировать сигнал задания, соответствующий средней температуре на выходе из предыдущего нагревателя и обеспечивать его постоянную и эффективную по быстрдействию коррекцию при наличии внешних возмущений или при смене входных параметров нагревателя.

Функциональная схема системы управления индукционным устройством для нагрева и перемешивания представлена на рис. 6.7.

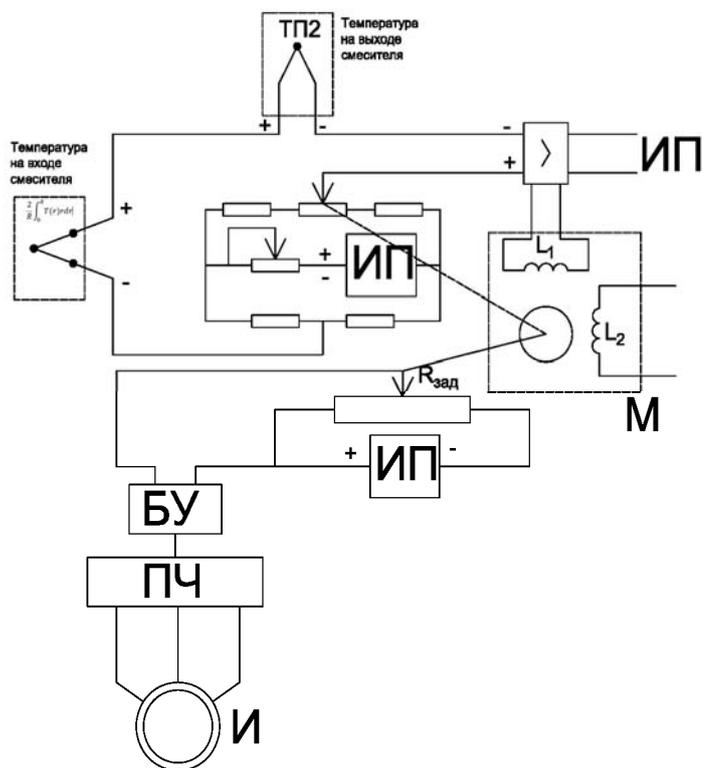


Рис 6.7. Функциональная схема системы управления

6.5. Система управления нагревательным комплексом

Варианты конструктивного исполнения индукционного нагревательного комплекса для технологического нагрева жидкости в зависимости от требуемой производительности и характеристик нефти представлены на рис.6.8 и рис.6.9.

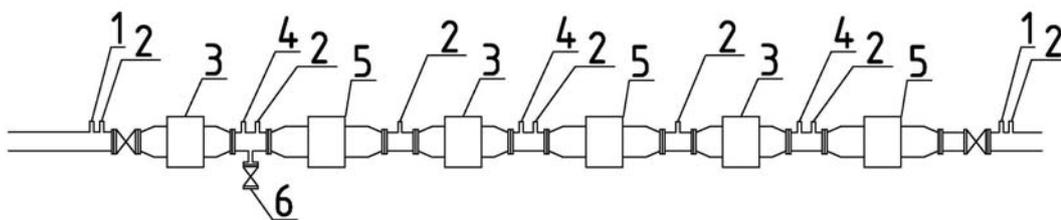


Рис. 6.8. Установка технологического нагрева нефтис последовательным соединением нагревательных секций 1 –Датчик давления, 2 –Датчик температуры, 3 –Индуктор проточный, 4 –Индуктивный датчик, 5 –Индуктор смеситель, 6 –Клапан сливной

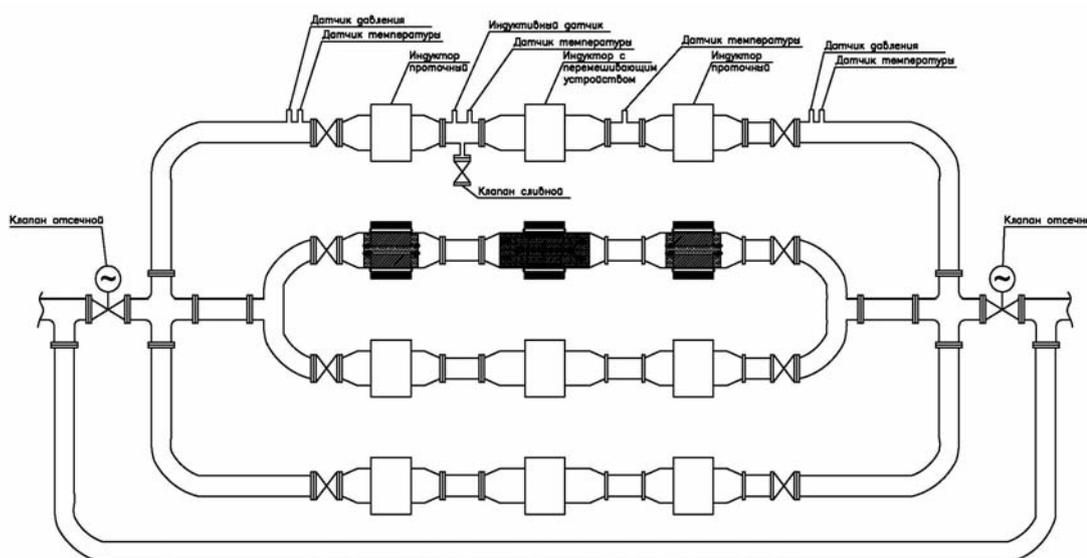


Рис. 6.9. Установка технологического нагрева нефтис параллельным соединением нагревательных секций

Функциональная схема технологической нагревательной установки показана на рис.6.10.

Функциональная схема состоит из следующих конструктивных элементов:

- автоматизированное рабочее место; микропроцессорный контроллер;
- трехфазный частотный преобразователь для регулирования частоты вращения секции смесителя;
- однофазные преобразователи частоты для питания индукционных нагревателей;
- регуляторы температуры и регуляторы частоты вращения ротора – смесителя;

– датчики температуры, устанавливаемые в разных точках потока жидкости и на стенке трубы;

– конденсаторные установки для компенсации реактивной мощности индукционных нагревателей.

Питание технологической установки осуществляется от комплектной трансформаторной подстанции.

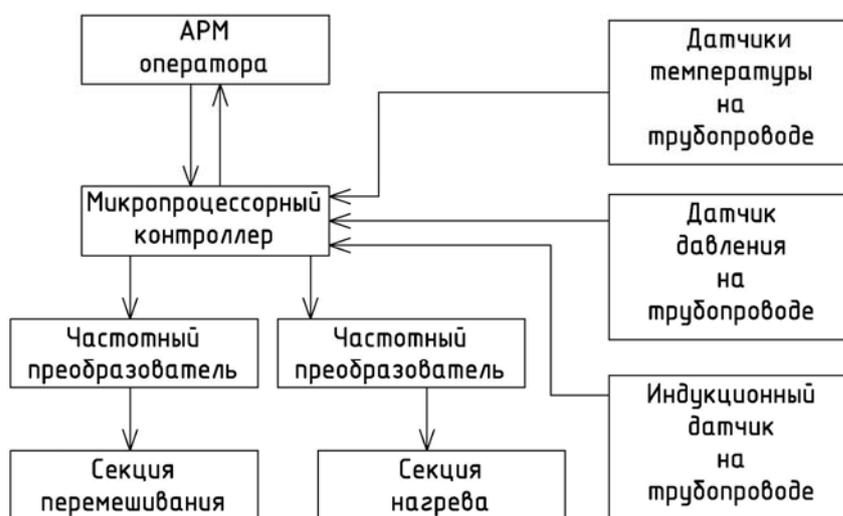


Рис. 6.10 .Функциональная схема установки

С логических микропроцессорных устройств, реализованных на микроконтроллере, сигналы задания температуры жидкости на выходе каждой секции нагревателя поступают на ПИ – регуляторы, где реализовано вычисление сигнала ошибок ε_0 . Каждый из сигналов ε_0 поступает на «свой» блок ПИ –регулятора. ПИ –регуляторы вырабатывают сигналы, поступающие на вход блока расчёта требуемой мощности каждой секции. Блок рассчитывает необходимую для отработки рассогласования мощность.

В качестве управляющего контроллера может быть использован программируемый логический контроллер фирмы НПФ «Прорыв» серии ТК-16. Эта модель имеет высокий уровень быстродействия, а также обладает большой надежностью аппаратной части и программного обеспечения.

Каждый вычислительный блок реализуется в виде отдельного блока – функции (Function Block) программы контроллера. Это позволяет модифицировать алгоритм любого блока, не изменяя остальные блоки.

Выводы

– На основании выполненных исследований разработана функциональная схема многосекционного индукционного нагревательного комплекса, включающего однофазные индукционные нагреватели и трехфазные индукционные устройства для перемешивания и нагрева жидкости с системами управления и регулирования процессами нагрева и перемешивания.

– Получена передаточная функция индукционного нагревателя как объекта с распределенными параметрами. На базе полученной передаточной функции разработана система автоматического управления процессом нагрева автономной секции нагревателя с обратной связью по средней по сечению потока температуре жидкости.

– Предложена оценка средней температуры по четырем характерным точкам в сечении потока на выходе из секции.

– Предложена следящая система, обеспечивающая эффективное перемешивание жидкости за счет изменения частоты вращения ротора–смесителя по рассогласованию между сигналом о средней температуре на выходе из нагревателя и сигналом о температуре поверхностного слоя жидкости на выходе из смесителя.

– По результатам исследований разработана функциональная схема индукционного нагревательного комплекса, включающего однофазные индукционные нагреватели, трехфазные индукционные устройства для перемешивания и автоматизированную систему управления комплексом на базе микропроцессорной техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты.

– Разработана методика синтеза оптимальных алгоритмов пространственного распределения мощности многосекционного индукционного нагревательного комплекса, обеспечивающая улучшенные массогабаритные показатели.

– Предложены методика и алгоритм решения комплексной задачи тепломассопереноса при нагреве потока жидкости в многосекционном индукционном нагревательном комплексе.

– Разработана компьютерная модель взаимосвязанных электромагнитных, электродинамических и тепловых процессов в системе «трехфазный индуктор- труба- ротор- поток жидкости».

– 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тугунов П.И., Новоселов В.И. Транспортирование вязких нефтей и нефтепродуктов по трубопроводам. М., Недра, 1972. . – 158 с.
2. Фонарев З.И. Электроподогрев трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования в нефтяной промышленности. – Л.: Недра, 1984.
3. Трубопроводный транспорт вязких нефтей /Н.К. Надиров, П.И. Тугунов/, Алма –Ата, Наука, 1985. – 146с.
4. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали // М.: Энергоатомиздат, 1988. — 200 с.
5. Горбатков С.А., Кувалдин А.Б., Минеев, В.Е, Жуковский, В.Е. Химические аппараты с индукционным обогревом.– М.: Химия, 1985.– 176 с.: ил.
6. Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. – М.: Инфра –Инженерия, 2015. – 272с.
7. Шатов В.А. Разработка методики расчета и исследование коаксиальной индукционно –резистивной системы нагрева промышленной и повышенной частоты. Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Москва, 2006.–20 с.
8. Конесев, С.Г., Хлюпин, П.А. Экологические нагревательные системы для объектов транспорта и хранения нефти // Безопасность жизнедеятельности, 2012 . –№7. – С. 35 –42.
9. Фонарев З. И. Электроподогрев трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования в нефтяной промышленности. – Л.; Недра, 1984. – 148 с.
10. Ковригин Л.А., Макиенко Г.П., Акмалов И.М. Нагревательные кабели и управление температурным полем нефтяных скважин // Рускабель, 2004.

11. Теплолюкс –сервис. Саморегулирующаяся нагревательная лента TSA / TSA [Электронный ресурс]. <http://prom-obogrev.ru/catalog/nagrevatelnye-kabeli/samoreguliruyushchiysya-nagrevatelnyy-nizkotemperaturnyy-kabel-tsa>(дата обращения 01.04.2018)

12. Специальные системы и технологии // [Электронный ресурс].– www.sst.ru (дата обращения 01.05.2018).

13. Тугунов П.И. Нестационарные режимы перекачки нефтей и нефтепродуктов. – М.: Недра, 1984, – 224 с.

14. Фонарев З.И., Иванов Г.И., Еремин И.И. Электроподогрев трубопроводов на нефтебазах. Обзорная информация. Серия “Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов”. М., ВНИИОЭНГ, 1982.

15. Данилушкин В.А.. Оптимизация конструкции и режимов работы индукционных подогревателей высоковязких нефтей при транспортировке по трубопроводам//Вестник Самарского Государственного Технического Университета//Серия “Технические науки”, Вып. № 20 –2004 С.176 –179.

16. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Зиннатуллин Д.А. Исследование электромагнитных и тепловых полей в установке технологического нагрева нефти. // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», 2004г., Вып.24.– с. 171–173.

17. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Васильев И.В. Моделирование электромагнитных процессов в многослойной трехфазной индукционной цилиндрической системе Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2017. № 3 (55). С. 50 –60.

18. Данилушкин В.А., Калашников С.Н. Индукционный подогрев высоковязких нефтей при транспортировке по трубопроводам // Разработка, эксплуатация и обустройство нефтяных месторождений: Тр. ОАО Гипровостокнефти, Самара, 2002, с. 195 –200.

19. Исследование теплообмена и сопротивления при ламинарном течении вязкопластичных нефтей в трубопроводах/ Н.М. Андреев, В.Е. Губин, Н.М. Гостев и др. – В кн. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов (ВНИИСПТнефть, 1981 г.)

20. Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А. и др. Установки индукционного нагрева. 1981.– 326 с.

21. Handbook of Induction Heating. Valeri Rudnev, Don Loveless, Raymond Cook, Mican Black. New York Basel 2003, p. 777.

22. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

23. Вайнберг, А.М. Индукционные плавильные печи [Текст] / А.М. Вайнберг. — М.: Энергия, 1967. – 416 с.

24. Бабат, Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение [Текст] / Г.И. Бабат. — М.– Л.: Энергия, 1965.– 552 с.

25. Безручко, И.И. Индукционный нагрев для объемной штамповки [Текст] / И.И. Безручко. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд–ние, 1987. – 127 с.

26. Родигин, Н.М. Индукционный нагрев стальных изделий [Текст] / Н.М. Родигин. — М.:Металлургиздат, 1950. – 246 с.

27. Конесев С.Г. Система индукционного ВЧ –обогрева трубопроводов установки по производству битума // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: межвуз. сб. науч. тр., 2005. – С. 69 –74.

28. 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 Все рос. науч. –техн. конф. (с межд. уч.). – Уфа: УГНТУ, 2011. – С. 211 –218.

29. Горбунов А.С. Трансформаторно –индукторные модули для комплексных электротехнологических процессов с индукционным нагревом.

Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Уфа, 2015.–16 с.

30. Хлюпин П.А. Индукционная нагревательная система для нефтепроводов: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Уфа, 2015. – 22 с.

31. Трофименко К. В., Шишкин Н. Д. Разработка конструкции и оценка параметров индукционного подогревателя нефти и нефтепродуктов. Вестник АГТУ 2012, №1 (53). С. 78–83.

32. Шишкин Н. Д. Применение индукционного подогрева нефти при её транспортировке от месторождений на Северном Каспии. Вестник АГТУ, 2011, №3, С.52 –56.

33. Данилушкин В.А. Разработка и исследование индукционных установок косвенного нагрева в технологических комплексах транспортировки нефти диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Самара, 2004.

34. Батищев А.М. Исследование и повышение эффективности системы косвенного индукционного нагрева жидкости. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук / Самара, 2007.

35. Зиннатуллин Д.А. Исследование и разработка трубчатого индукционного нагревателя жидкости: диссертация ... канд. техн. наук: 05.09.10/ Д.А. Зиннатуллин.– Самара, 2007.– 128 с.

36. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Васильев И.В. Энергоэффективный технологический комплекс для нагрева вязкой жидкости. Градостроительство и архитектура. 2016. № 4 (25). С. 127 –133.

37. Gagliardi Francesco, Ambrogio Giuseppina, Filice Luigino. Incremental Forming with Local Induction Heating on Materials with Magnetic and Non – magnetic Properties / Procedia Engineering Volume 183, 2017, Pages 143 –148.

38. Jaber Taheri –Shakib, Ali Shekarifard, HassanNaderi. Experimental investigation of comparing electromagnetic and conventional heating effects on the unconventional oil (heavy oil) properties: Based on heating time and upgrading / Fuel Volume 228, 15 September 2018, Pages 243 –253.

39. Немков В.С., Полеводов П.С. Математическое моделирование на ЭВМ устройств высокочастотного нагрева. Л.: Машиностроение, 1980.–64 с.
40. Павлов Н.А. Инженерные тепловые расчеты индукционных нагревателей. М.–Л.: Энергия, 1978.–120с.
41. Yi Han, En –Lin Yu, Tian –Xu Zhao. Three –dimensional analysis of medium –frequency induction heating of steel pipes subject to motion factor / International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 101, October 2016, Pages 452 –460.
42. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. 392с
43. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация [Текст] / О. Зенкевич, К. Морган. — Л.: Мир, 1986. – 318 с.
44. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О.Зенкевич. — М.: Мир, 1975. – 541 с.
45. Андреев Ю.Н. Оптимальное проектирование тепловых агрегатов. – М.: Машиностроение, 1983. – 231 с.
46. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. – М.: Радио и связь, 1984. – 288 с.
47. Геминтерн В.И., Коган Б.М., Методы оптимального проектирования. – М.: Энергия, 1980. – 160 с.
48. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования.: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1984. –248 с.
49. Базаров, А.А. Моделирование и интегрированное проектирование систем индукционного нагрева сопряженных физически неоднородных объектов. Автореф. дисс. .. доктора техн. наук. – Самара, 2010. – 40 с.
50. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Metallurgia, 1993. – 279 с.
51. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2005. – 292с.

52. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 677с.

53. Зимин, Л.С. Оптимальное проектирование систем индукционного нагрева в технологических комплексах обработки металла давлением. Автореф. дисс. ... доктора техн. наук. – Ленинград, 1987. – 30 с.

54. Лившиц М.Ю. Теория и алгоритмы оптимального управления термодиффузионными процессами технологической теплофизики по системным критериям качества: Автореф. дис... докт. техн. наук. – Самара, 2001. – 46 с.

55. Афиногентов, А.А. Моделирование и оптимальное управление технологическим комплексом «нагрев–обработка металла давлением». Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Самара, 2008.–23 с.

56. Гусева М А. Автоматическое управление технологическим процессом индукционного нагрева нефти в установках трубопроводного транспорта. Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Самара, 2012.–22 с.

57. Осипова, Ю.А. Оптимизация переходных режимов работы индукционных нагревательных установок методического действия. Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Самара, 2007.–21 с.

58. Заикина Н.В. Моделирование и оптимальное управление процессом индукционного нагрева алюминиевых заготовок, вращающихся в магнитном поле постоянного тока. Дисс.... кандидата техн. наук Самара, 2010. – 149с.

59. Шаропова О.Ю. Численное моделирование и оптимальное управление процессами индукционного нагрева цилиндрических заготовок под обработку давлением. Дисс.... кандидата техн. наук Самара, 2011. – 177с.

60. Синдяков Л.В. Оптимизация энерготехнологических характеристик установившихся режимов работы индукционных установок непрерывного действия для нагрева стальных заготовок: Автореф. дисс.... канд. техн. наук. – Л., 1984.–19 с

61. Осипов, О.О. Комплексная оптимизация конструктивных и режимных параметров установок непрерывного индукционного нагрева заготовок подшипниковых колец. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 2002. – 21 с.

62. Кожемякин А.В. Исследование и разработка двухчастотного индукционного нагревателя: Автореф. дис....канд. техн. наук. – Самара, 2012. – 20 с.

63. Князев С.В. Оптимизация переходных режимов индукционного нагревателя дискретно –непрерывного действия: Автореф. дис....канд. техн. наук. – Самара, 2013. – 24 с.

64. Мостовой А. П. Повышение энергоэффективности нестационарных режимов индукционных нагревателей методического действия: диссертация кандидата технических наук Самара, 2015. – 147с.

65. Плешивцева, Ю.Э. Последовательная параметризация управляющих воздействий и полубесконечная оптимизация алгоритмов управления технологическими объектами с распределенными параметрами. Автореф. дисс. .. доктора техн. наук. – Самара, 2009. – 50с.

66. Данилушкин, А.И. Структурное моделирование и автоматическое управление объектами индукционного нагрева с распределенными параметрами в специализированных технологических процессах. Автореф. дисс. .. доктора техн. наук. – Самара, 1999. – 45с.

67. Жуйко П.В. Разработка принципов управления реологическими свойствами аномальных нефтей: автореф. дисс. д –ра техн. наук. – Ухта, 2003. – 43 с.

68. Чекалкин, А.Л., Гурьянов, Д.С. Повышение надежности работы пункта подогрева нефти НПС «Чикшино» // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродукты, 2011. – №2. – С. 80 – 83.

69. Конесев, С.Г., Хлюпин, П.А. Оценка эффективности теплового воздействия электротермических систем // Нефтегазовое дело: науч. техн. журн., 2012. – Т. 10. – № 3. – С. 92 –95.

70. Конесев С.Г. Макулов И.А. Хлюпин П.А., Высокотехнологичные системы индукционного нагрева на ДНС // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Все рос. науч. –техн. конф. – Уфа: УГНТУ, 2009. – т.2. – С. 21 –25.

71. Конесев С.Г. Хлюпин П.А., Системы индукционного нагрева для магистральных нефтепроводов // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. Все рос. науч. –техн. конф. – Уфа: УГНТУ, 2007. – С. 127 –130.

72. Данилушкин В.А., Шумаков М.А., Калашников С.А. Аналитическая идентификация процессов теплопроводности в системе «индуктор–тепловыделяющий цилиндр– жидкость» // Труды двенадцатой межвуз.конф. «Математическое моделирование и краевые задачи». Ч.2. Самара, 2002, с. 28 –31.

73. Lark B. Heavy oil subgroup of the technology task group of the NPC committee on global oil and gas / B, Clark, W. Gordon Graves, Jorge E. Lopez –de – Cardenas, Mariano E. Gurfinkel, Allan W. Peats // National petroleum council, 2007. – topic paper №22. p. 54.

74. КонесевС.Г., КондратьевЭ.Ю., ХазиеваР.Т., КоневА.А. The research of heating efficiency of different induction heating systems (Исследованиеэффективностиработыиндукторовразличного типа) // MATEC Web of Conferences: 12th International Scientific –Technical Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”– 2017 (XII Междунар. науч. –техн. конф. «Завалишинские чтения– 2017»), индексируемом в базах SCOPUS и Web of Science. St. Petersburg, April 18 –22, 2017. – Volume 113, 2017. – Article Number 01002. – Number of page(s) 4. – DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711301002>

75. Павлов Е.А. Магнитогидродинамический перемешиватель алюминиевых расплавов в миксере сопротивления. Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Красноярск, 2006.–22 с.

76. Сарапулов С.Ф. Индукционные магнитогидродинамические машины технологического назначения для электромеханического воздействия на металлические расплавы. Автореф. дисс. .. доктора техн. наук. – Екатеринбург, 2011. – 41с.

77. Христинич Р.М. Индукционные устройства для технологического воздействия на жидкие металлы. . Автореф. дисс. .. доктора техн. наук. – Красноярск, 2000. – 38с.

78. Идиятулин А.А. Разработка индукционного вращателя жидкометаллической загрузки плавильного агрегата и исследование его электромагнитных и гидродинамических характеристик. Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2010.–22 с.

79. Фризен В.Э. Индукционные комплексы для инновационных электрометаллургических технологий. Автореф. дисс. .. доктора техн. наук. – Екатеринбург, 2014. – 39с.

80. Карпукин С.В., Краснянский М.Н., Борисенко А.Б. Расчёты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов: учебное пособие / С.В. Карпушкин, М.Н. Краснянский, А.Б. Борисенко.– Тамбов : Ихд –во Тамб. Гос. Техн. ун –та, 2009.– 168 с.

81. Поляков В.В., Скворцов Л.С. Насосы и вентиляторы: Учеб. для вызов.– М.: Стройиздат, 1990.– 336 с.

82. Юрьев А.С., Пирогов С.Ю., Низовцев В.М., Грачев И.Г., Преснов А.И., Савищенко Н.П., Соколова А.Н. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем.– С. –Пб, АНО НПО "Мир и Семья", 2001. 1154 с.

83. Михайлов А.К., Малюшенко В.В. Лопастные насосы. Теория, расчеты и конструирование.–М., "Машиностроение" 1977.– 288с.

84. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М., Энергоатомиздат, 1984.– 424с.
85. Башуров Б.П. Судовые насосы и вентиляторы. В/О Мортехреклама, 1983.– 32с
86. Данилушкин А.И., Кривошеев В.Е., Васильев И.В. Многосекционная установка косвенного индукционного нагрева жидкости Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2018. № 1 (57). С. 92 –101.
87. Кувалдин А.Б. и др. Электротепловая модель индукционно–резистивной системы нагрева // Электромеханика.– 2005. – №1. – с. 48–53.
88. Фомин Н.И., Затуловский Н.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. М.: Металлургия, 1979. с.239 – 243.
89. EHR Funds Innovative Technology Improvement Product Development Program for Heavy Oil Production in Saskatchewan, Canada // EHR Enhanced Hydrocarbon Recovery Inc. [Электронныйресурс]. – <http://www.hydrocarbonrecovery.com/EHR/News%20PDF's/07-20-12%20EHR%20sponsors%20new%20heavy%20oil%20technology%20research.pdf> (датаобращения 01.10.2017)
90. Данилушкин А.И. Математическое моделирование и оптимизация процесса извлечения легкоплавкого наполнителя из металлического корпуса методом индукционного нагрева. // Вестник СамГТУ. Научн. журнал. Серия «Физико –математические науки» № 7–1999. с. 151–158.
91. Данилушкин А.И., Зиннатуллин Д.А. Математическое моделирование и оптимизация параметров теплообменного аппарата с индукционным нагревом. Математическое моделирование и краевые задачи. Труды Второй Всероссийской научной конф. Самара, 2005, ч.2, с.84–87.
92. Данилушкин А.И., Зимин Л.С. Идентификация процесса низкотемпературного индукционного нагрева при обработке полимерных

материалов. // Ж –л «Вестник Самарского технического университета.»
Серия «Технические науки.» №1, 1994, с. 171 –177.

93. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи / Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 512 с., с ил.

94. Шкадов В.Я., Запрянов З.Д. Течение вязкой жидкости. – М.: Издательство Московского университета, 1984. – 200 с.

95. Болгарский А.В. Термодинамика и теплопередача. Учебн. Для вузов. Изд. 2 –е, перераб. и доп.– М.: «Высш. школа», 1975.

96. Нечваль А.М. Основные задачи при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов: Учеб. пособие.– Уфа: Изд –во УГНТУ, 2005.– 81 с.

97. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости.– М.: Энергоатомиздат, 1984.– 124 с.

98. Мельников А.А. Расчет электромагнитных и температурных полей методом конечных элементов. Уч. Пособие / Моск. гос. ин –т радиотехники, электроники и автоматики (техн. ун –т) – М., 2001. – 76 с.

99. Справочник по гидравлике / под ред. В.А. Большакова, К.: Высшая школа, 1984. –343 с.

100. Теплофизические свойства жидкостей и газов Сб. статей – Махачкала: Б.и., 1979. – 127с.

101. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. В 2 –х т.: Т.1. Пер. с англ. –М.:Мир, 1991. – 504с.

102. Шумаков М.А., Данилушкин В.А. Индукционные установки для нагрева жидких форм при производстве мастик на основе тяжелых фракций нефтепродуктов. // Тезисы докладов 8 –й Международной науч. –техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Т.2. М.: Издательство МЭИ, 2002, с. 123 –124.

103. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Васильев И.В. Трехфазный индуктор с вращающимся магнитным полем для нагрева

массивных заготовок Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 6 (548). С. 24 –29.

104. Лутошкин, Г.С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды. – М.: Недра, 1977.– 192 с.

105. Todd A., JankowskiNorma H., PawleyLindsey M., GonzalesCraig A., RossJames D. Approximate analytical solution for induction heating of solid cylinders / A.Todd H. JankowskiNorma M. PawleyLindseyA.GonzalesCraigD.RossJames // Applied Mathematical Modelling Volume 40, Issue 4, 15 February 2016, Pages 2770 –2782.

106. Sun, Jianliang, Li, Shuoa, QiuChouwu, Peng, Yan. Numerical and experimental investigation of induction heating process of heavy cylinder /Applied Thermal Engineering Volume 134, April 2018, Pages 341 –352.

107. Тозони О.В., Майергойз И.Д. Расчёт трехмерных электромагнитных полей. – К.: Техника, 1974. – 352 с.

108. Васильев И.В. Применение систем индукционного нагрева в технологических комплексах подготовки и переработки нефти и нефтепродуктов /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.

109. Базаров А.А., к.т.н.,доц.,Зиннатуллин Д.А., асп., Тершукова Е.С., студ., (СамГТУ, Самара). Электротепловые процессы в индукционном трубчатом нагревателе жидкости. Труды Международной научно – технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии». (XIII Бенардосовские чтения),Ивановский государственный энергетический университет, Иваново,18–20 октября, 2006г.,с. 175–177.

110. Васильев И.В., Данилушкин А.И., Данилушкин В.А. Исследование и анализ энергетических параметров индукционного нагревателя жидкости. Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 5 (8). С. 39–46.

111. Данилушкин В.А., Зиннатуллин Д.А. Расчет и анализ индукционных нагревателей для транспортировки нефти // Разработка, эксплуатация и обустройство нефтяных месторождений: Тр. ОАО Гипровостокнефти, Вып. 62, Самара, 2003, стр. 115–122.

112. 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.

113. Lenka Jakubovičová, Andrej, Gašparec, Peter, Kopas, Milan, Sága. Optimization of the Induction Heating Process in Order to Achieve Uniform Surface Temperature / Procedia Engineering Volume 136, 2016, Pages 125–13

114. 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.

115. Данилушкин А.И., Крылов А.Н., Шумаков М.А. Оптимальное проектирование конструкции и режимов индукционных нагревателей в специализированных комплексах обработки неэлектропроводных материалов. // Труды Академии Электротехнических Наук Чувашской республики / Под ред. проф. Миронова Ю.М. – Чебоксары: Чувашский государственный университет. №1 – 2003, с.27–30.

116. 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.

117. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 110 с.

118. 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.

119. Bogdan Drobenko, Petro Vankevych, Yevhen Ryzhov, Maksym Yakovlev Rational approaches to high temperature induction heating/ International Journal of Engineering Science Volume 117, August 2017, Pages 34 –50.

120. Данилушкин А.И., Батищев А.М., Зиннатуллин Д.А. Синтез квазиопти –мальных алгоритмов пространственного распределения мощности индукционного нагревателя жидкости. Труды Третьей Всероссийской научной конференции. Ч. 2.: Моделирование и оптимизация динамических систем и систем с распределенными параметрами. Самара, СамГТУ, 2006. – С. 46–49.

121. Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Васильев И.В. Оптимизация стационарного режима двухсекционного индукционного нагревателя Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 20 –25.

122. Данилушкин А.И., Васильев И.В.. Оптимизация стационарных и переходных режимов индукционных нагревателей непрерывного действия В сборнике: Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии (ПЭЭЭ –2017) V Всероссийская научно –техническая конференция (к 50 –летию юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» Института энергетики и электротехники). Министерство образования и науки российской федерации, Тольяттинский государственный университет, Институт энергетики и электротехники. 2017. С. 368 –375.

123. 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.

124. Базаров А.А., Данилушкин В.А., Крылов А.Н. Синтез оптимальных алгоритмов управления процессом непрерывного индукционного нагрева ферромагнитной загрузки. Труды АЭНЧР, №1/2003, стр.88 – 91.

125. Егоров А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. М.: Наука, 1978. – 464 с.

126. Зимин Л.С. Методы оптимального проектирования систем индукционного нагрева. //Алгоритмизация и автоматизация технологических процессов и промышленных установок: Межвузовский сборник научных трудов, 1977. – Вып. 8. – с.142 – 146.

127. Рей У. Методы управления технологическими процессами: Пер с англ. – М.: Мир, 1983. – 368 с.

128. Батищев А.М., Крылов А.Н. Математическое моделирование динамики управляемого процесса тепломассопереноса в червячном экструдере. В сборнике: Математическое моделирование и краевые задачи Труды Второй Всероссийской научной конференции. Редколлегия: В. П. Радченко (отв. редактор), Э. Я. Рапопорт, Е. Н. Огородников, М. Н. Саушкин (отв. секретарь). 2005. С. 40 –43.

129. Мусавирова Г.А., Мухаметова Э.М. Исследование влияние тепловых воздействий и скорости охлаждения на процесс парафинизации [Текст]: Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, 2005. – №6. – С. 50 –52.

130. Конесев, С.Г. Многофункциональные интегрированные элементы для управляемых систем питания устройств специального назначения: дисс. Канд. техн. наук. – Уфа, 1992. – 182 с.

131. Бутковский А.Г. Оптимальное управление нагревом металла / А.Г. Бутковский, С.А. Малый, Ю.Н. Андреев. — М.: Металлургия, 1972. – 439 с.

132. Лыков, А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. — М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

133. Агапкин В.М., Кривошеин Б.Л., Юфин В.А. Тепловой и гидравлический расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов. М., Недра, 1981, 256 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Общество с ограниченной ответственностью «Газпром добыча Ямбург»
(ООО «Газпром добыча Ямбург»)

« 13 » 09 20 18 г.

№ 44907



УТВЕРЖДАЮ

**Заместитель Главного инженера по
научно-технической работе и экологии**

А.К. Арабский

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационного исследования

Секция «Энергетика и энергосбережение» Научно-технического Совета рассмотрела диссертационную работу аспиранта Васильева Ивана Владимировича на тему «Индукционный нагревательный комплекс для термообработки вязких жидкостей». Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет». В рамках диссертационной работы разработана «Методика расчета конструктивных и режимных параметров трехфазного индукционного нагревателя для нагрева и перемешивания вязких жидкостей», которая использована при организации экспериментальной добычи нефти из нефтяных оторочек нефтегазоконденсатных месторождений ООО «Газпром добыча Ямбург», расположенных за Полярным кругом. Индукционный нагреватель нефти используется в процессе опытной эксплуатации нефтедобывающих скважин. Параллельно накапливается опыт для внедрения отработанных решений и включения их в проект установок промышленной добычи нефти из нефтяных оторочек месторождений Ямбурга.

**Заместитель председателя секции,
главный энергетик – начальник отдела**

Э.Ю. Кондратьев

Секретарь секции

Н.В. Бахтинова

0330