

### **Отзыв официального оппонента**

о диссертационной работе Васильева Ивана Владимировича на тему:  
«Совершенствование индукционного нагревательного комплекса для термообработки вязких жидкостей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.10 – Электротехнология

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы (133 наименования) и одного приложения. Общий объем работы - 130 стр., в том числе 77 рисунков и 7 таблиц.

#### **Актуальность темы диссертационной работы**

Совершенствование работы трубопроводного транспорта вязких жидкостей (прежде всего, нефти и нефтепродуктов) остается актуальной задачей, хотя в этой области работали и работают многие исследователи в России и других странах и уже достигнуты хорошие результаты. Одним из путей решения этой задачи является нагрев жидкости и поддержание требуемого значения ее температуры для снижения вязкости. Еще в конце XIX века в Баку был построен трубопровод для перекачки мазута с предварительным нагревом его водяным паром и в течение длительного времени этот способ оставался востребованным.

С 60-ых годов XX века для этой цели начали применять различные виды электронагрева: резистивный, индукционный и комбинированный индукционно-резистивный. При этом рассматриваются два варианта транспортирования вязкой жидкости: предварительный нагрев с использованием необогреваемого теплоизолированного трубопровода и подогрев трубопровода по всей его длине. В нашей стране ведущее положение в создании систем оборудования для резистивного кабельного и индукционно-резистивного обогрева трубопроводов занимает группа компаний «Специальные системы и технологии» («ССТ»), г. Мытищи Московской области.

Рассматриваемая диссертационная работа посвящена улучшению массогабаритных характеристик индукционного комплекса для нагрева вязких жидкостей перед транспортированием с использованием необогреваемого трубопровода, что потребовало проведения исследования процессов теплообмена на границе стенка трубы – вязкая жидкость и в самой жидкости, разработки конструктивных решений устройств нагрева и перемешивания, а также вопросов управления этими процессами. Решение поставленных задач усложняется наличием ограничений на скорость движения и температуру нагрева жидкости, что приводит к ограничению значений удельной поверхностной мощности в трубе и температуры стенки трубы.

Автором диссертации предложено конструктивное решение, объединяющее эффекты индукционного нагрева и перемешивания, которое может улучшить характеристики системы нагрева вязкой жидкости. Разработка такого устройства, связанное с проведением теоретических исследований для определения его электрических и тепловых характеристик, является актуальной.

## **Оценка научной новизны и значимости результатов, полученных в диссертации**

Научной новизной обладают следующие теоретические результаты исследований, приведенные в диссертационной работе:

1. Математическая модель взаимосвязанных тепловых и гидравлических процессов в системе «труба–вращающийся ротор–жидкость», с использованием которой реализуется расчет характеристик устройства нагрева и перемешивания вязкой жидкости.
2. Методика оптимального проектирования и управления связанными процессами нагрева и перемешивания жидкости, применение которой позволило интенсифицировать теплообмен между стенкой трубы и жидкостью и достичь снижения массогабаритных характеристик нагревательного комплекса.
3. Алгоритмы распределения мощности по длине индукционного нагревательного комплекса, в которых учитывались ограничения на удельную поверхностную мощность и условие максимальной температуры стенки трубы.

### **Степень обоснованности и достоверности результатов**

В исследованиях корректно использовано компьютерное моделирование (программные пакеты *Comsol* и *Elcut*), основанное на решении дифференциальных уравнений, которые описывают процессы индукционного нагрева, течения жидкости и теплообмена между стенкой и жидкостью.

Достоверность результатов, приведенных в диссертационной работе, подтверждается согласованностью их результатов с данными работ других авторов, приведенными в литературе.

### **Практическая значимость результатов работы**

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана оригинальная конструкция трехфазного индукционного устройства, обеспечивающего нагрев и перемешивание вязкой жидкости, что позволило сократить длину многосекционного нагревателя.
2. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для расчета электромагнитных, тепловых и гидравлических характеристик трехфазного индукционного устройства, на основании которого определяются значения мощности нагрева и момента вращения ротора, необходимые для достижения заданной температуры вязкой жидкости.
3. Разработана структура системы автоматического управления индукционным нагревательным комплексом, обеспечивающая требуемый режим работы и учитывающая технологические и энергетические ограничения.

Результаты диссертационной работы использованы в процессе опытной эксплуатации индукционного нагревателя на нефтедобывающих скважинах ООО «Газпром добыча Ямбург», что подтверждено актом внедрения.

### Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе 5 работ в изданиях по перечню ВАК.

### Замечания по диссертационной работе

1. Целью работы является «улучшение массогабаритных характеристик индукционного нагревательного комплекса для нагрева вязких жидкостей». Не ясно, почему автор при этом не рассматривает такие характеристики нагревательного комплекса как стоимость, энергетические показатели, удобство эксплуатации, надежность и ресурс работы. В частности, оправдано ли применение предлагаемого комплекса, если «длина индукционной системы уменьшается примерно на 30%» (Глава 5; стр.97) ?
2. В работе отсутствует технико-экономическое обоснование эффективности предложенного индукционного нагревательного комплекса по сравнению с альтернативными вариантами. Следовало бы подтвердить, что существуют такие диапазоны диаметров и длин участков трубопроводов для перекачки вязких жидкостей, для которых использование этого комплекса целесообразно.
3. Глава 3 посвящена разработке и исследованию численной модели взаимосвязанных электромагнитных, электродинамических и тепловых процессов в системе «трехфазный индуктор – труба – ротор – поток нефти», основанная на ряде упрощений и допущений. Однако проверка адекватности и оценка погрешности расчетов не приведены.
4. В таблице 3.2 (стр.58) указана доля мощности на вращение. Однако перемешивание вязкой жидкости приводит к ее нагреву. Как учитывается этот эффект в расчетах?
5. В расчетах нет сведений о тепловых потерях устройств, зависящих от тепловой изоляции и температуры окружающей среды. Как повлияет учет тепловых потерь на результаты расчетов?
6. В главах 3, 4 и 5 все расчеты проведены для одного значения диаметра трубы (260 мм). В какой степени полученные результаты могут быть использованы для труб других диаметров? Приведенное в конце диссертации Заключение также не содержит информации по диапазонам значений параметров (диаметры труб, расходы жидкости и т.д.), для которых применимы разработанные математические модели.
7. На стр. 82-83 на рис. 4.26, 4.28 и 4.29 (рис.4.27 отсутствует) приведены графики распределения температур по длине участка нагревателя, которые качественно отличаются: кривые вогнутая и выпуклая, а также прямая. Есть ли физическое объяснение этим отличиям роста температуры?
8. В тексте работы (Глава 4, стр.82) не показано, как «используя полученные для короткой системы результаты ... рассчитаны температурные распределения в различных продольных сечениях для секции нагревателя длиной 0,9

м». При этом необходимо учитывать изменения коэффициентов теплообмена между стенкой и жидкостью и коэффициента теплопроводности жидкости.

9. В автореферате указано (стр.12): «В работе приведены рекомендации по определению оптимального числа ребер в зависимости от диаметра теплоотдающей трубы». Однако в диссертации такие рекомендации отсутствуют.
10. На рис. 3.1 - 3.3 (стр.47) показаны магнитопроводы, однако в табл. 3.1 нет данных об их параметрах. Как наличие магнитопроводов учитывается в электромагнитных расчетах?
11. Список использованной литературы содержит 133 наименования, в том числе 26 ссылок на авторефераты докторских и кандидатских диссертаций, и мог бы быть существенно сокращен. Однако в нем не отражены патенты на конструктивные решения устройств индукционного нагрева и перемешивания (например. Патент РФ № [2257017](#) на изобретение «Индукционное устройство для нагрева и перемешивания жидких сред»).
12. В диссертации и автореферате имеются неточности и ошибки, том числе:
  - отсутствуют формулы (5.5) и (5.6) на стр.91 и 92;
  - отсутствует рис.4.27 (тр.82);
  - на вертикальной оси графика рис.4.34 (стр.86) вместо размерности скорости указана размерность температуры;
  - ошибки в списке литературы (поз. 87, 88, 109, 110, 123);
  - в списке публикаций в автореферате отсутствует поз. б.

### **Заключение**

В целом, представленная диссертация с учетом научной новизны и практической значимости заслуживает положительной оценки.

Диссертация отражает значительный объем проделанной автором теоретической работы по заявленной теме, что связано со сложностью решаемых в ней задач, связанных с компьютерным моделированием электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов в индукционных нагревательных комплексах, и выполнена на хорошем научно-техническом уровне. Разработанные автором математические модели индукционных нагревателей позволили решить сложные задачи их исследования, проектирования, управления и оптимизации.

Содержание диссертационной работы полностью соответствует научной специальности 05.09.10 – Электротехнология, так как в ней приведены исследования по разработке и оптимизации параметров электротехнологических индукционных нагревателей и систем управления, предназначенных для нагрева вязких жидкостей при их транспортировке по трубопроводам.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в статьях в рецензируемых научных журналах, внесенных в Перечень журналов и изданий, утвержденных Высшей аттестационной комиссией РФ.

Автореферат и опубликованные автором работы достаточно полно отражают содержание диссертации.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на хорошем научном уровне и содержащей результаты теоретических исследований процессов в индукционных нагревательных комплексах, предназначенных для использования в трубопроводном транспорте вязких жидкостей и рекомендации по практическому использованию этих результатов с целью улучшения массогабаритных характеристик данного электротехнологического оборудования.

По объему проведенной работы, уровню и значимости полученных научных и практических результатов диссертация соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Васильев Иван Владимирович заслуживает присвоения ему искомой степени по специальности 05.09.10 – Электротехнология.

Официальный оппонент,  
 профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологии»  
 Национального исследовательского университета  
 «Московский энергетический институт»,  
 заслуженный деятель науки РФ,  
 доктор технических наук, профессор

А. Б. Кувалдин

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14  
 тел. +7 (495) 362-70-75  
 e-mail:: kuvaldinab@mpei.ru

Подпись профессора Кувалдина А.Б. удостоверяю.

Зам. начальника управления

Л. И. Полевая

