

УДК 621.365

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАГРЕВА И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОСТИ ***А.И. Данилушкин, В.А. Данилушкин, М.А. Максимова, Д.В. Сурков**Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Рассмотрены вопросы разработки конструктивных и режимных параметров трехфазного индукционного устройства, совмещающего функции нагрева и перемешивания вязких жидкостей, в частности нефти и вязких нефтепродуктов. Отмечены специфические особенности технологического процесса транспортировки вязких жидкостей по трубопроводам. Показано, что высокая вязкость перекачиваемых жидкостей приводит к высоким энергетическим затратам. Одним из способов снижения энергозатрат является подогрев жидкости перед транспортировкой. Для повышения интенсивности теплообмена между стенкой трубы и потоком нагреваемой жидкости предлагается встроенное в трубопроводную систему индукционное устройство, которое одновременно выполняет функцию привода вращения колеса смесителя и нагревательного устройства. Представлены результаты численного расчета электрических параметров устройства. Показано, что подведенная к индуктору мощность распределяется на два потока – на мощность внутреннего тепловыделения в стенке ротора и на мощность вращения ротора. Установлена зависимость соотношения между тепловой энергией, выделяющейся в стенке ротора, и энергией, идущей на вращение ротора, от частоты вращения поля индуктора. Расчеты показали, что повышение частоты приводит к увеличению доли мощности на нагрев, а снижение частоты – к увеличению вращающего момента. Полученный вывод позволяет использовать частоту для выбора эффективного режима работы смесителя. Предложенное устройство целесообразно использовать в многосекционных нагревательных системах с целью оптимизации конструктивных и режимных параметров многосекционного нагревателя.

Ключевые слова: индукционный нагрев, математическая модель, трубопроводный транспорт, плотность тока, мощность, температура, вращающий момент.

Транспортировка по трубопроводам нефтяных продуктов, тяжелых масел, других аналогичных сред сталкивается со значительной вязкостью таких продуктов. Вязкость ограничивает в соответствии с законом Стокса [1, 2] возможность получить необходимую производительность трубопроводной системы, требует больших энергетических мощностей для транспортировки. Высокая вязкость обуславливает небольшие значения чисел Рейнольдса, вследствие чего в трубо-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212 А.

Данилушкин Александр Иванович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Данилушкин Василий Александрович (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Максимова Марина Александровна, аспирант.

Сурков Дмитрий Викторович, аспирант.

проводе формируется ламинарный режим течения [3, 4]. Вязкость отмеченных жидких сред гиперболически зависит от температуры. На рис. 1 приведены температурные зависимости вязкости нефтей различных месторождений [5].

Подогревом транспортируемой жидкости можно понизить величину вязкости, увеличив тем самым производительность трубопровода. В работах [6–8] для уменьшения вязкости авторы предлагают в качестве подогревателей различные электрические методы и устройства, встроенные в трубопроводную систему. Электроэнергия превращается в тепловую в специальных нагревательных кабелях или непосредственно в стенке трубопровода. В работах [9–11] рассматриваются устройства косвенного индукционного нагрева жидкостей с помощью цилиндрических индукционных катушек, расположенных на трубопроводе.

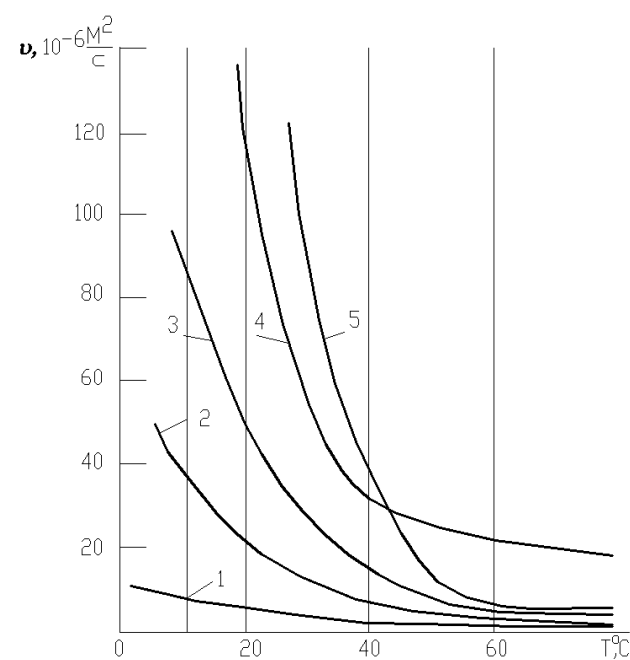


Рис. 1. Температурные зависимости вязкости нефтей:
1 – самотлорской; 2 – осинской; 3 – арланской;
4 – ножовской; 5 – узеньской

Под действием вихревых токов, наведенных в трубе, стенка трубы разогревается, в результате чего нагреваются слои жидкости, прилегающие к стенке трубы. Ламинарное течение вязкой жидкости носит слоистый характер. Жидкость течет по трубе параллельными слоями, один слой скользит по другому, слои не перемешиваются, т. е. практически отсутствует конвективная передача теплоты к оси потока жидкости. Нагрев внутренних слоев жидкости осуществляется лишь за счет теплопроводности. Низкая теплопроводность вязких жидкостей, ламинарный режим течения, нелинейное распределение скорости потока по радиусу не позволяют обеспечить на приемлемой длине нагревательной секции достаточный прогрев жидкости по всему сечению потока. Температура пристенного слоя быстро достигает предельно допустимого значения, определяемого физическими свойствами жидкости. Величина предельно допустимой температуры стенки трубы лежит в пределах $90 \div 100$ град. Вследствие этого по мере про-

движения жидкости от входа в нагреватель к выходу тепловой поток от стенки трубы в жидкость уменьшается. Это обстоятельство приводит к необходимости использовать протяженные нагревательные системы, состоящие из нескольких секций [12, 13]. Для увеличения теплоотдачи необходимо снижать температуру пристенного слоя жидкости. Эффективным способом увеличения теплообмена между стенкой трубы и жидкостью является активное перемешивание слоев жидкости, при котором внутренние холодные слои жидкости перемещаются к стенкам трубы [14].

В практике применения смесителей для привода вращения смесителя используются устройства, состоящие из электропривода, соединенного с лопастным колесом смесителя. Электродвигатель устанавливается с внешней стороны трубопроводной системы, что значительно усложняет конструкцию смесителя и увеличивает нагрузку на нагнетатель [15, 16].

В качестве альтернативного варианта для повышения интенсивности теплообмена между стенкой трубы и потоком нагреваемой жидкости в настоящей работе предлагается встроенное в трубопроводную систему трехфазное индукционное устройство, которое одновременно выполняет функцию привода вращения колеса смесителя и нагревательного устройства.

В работе [17] исследуется возможность использования индукционной нагревательной установки для нагрева алюминиевых сплавов в поперечном поле трехфазного индуктора с замкнутым магнитопроводом. Применение подобных индукторов позволит улучшить энергетические показатели. Однако их применение усложняет конструкцию нагревателя в связи с высокими рабочими температурами.

В последние годы значительно расширилось применение индукционных установок для низкотемпературных процессов, к которым относятся, в частности, процессы подготовки нефти при транспортировке по трубопроводам. Предлагаемая работа направлена на расширение возможностей индукционных устройств за счет использования трехфазных индукторов с вращающимся магнитным полем.

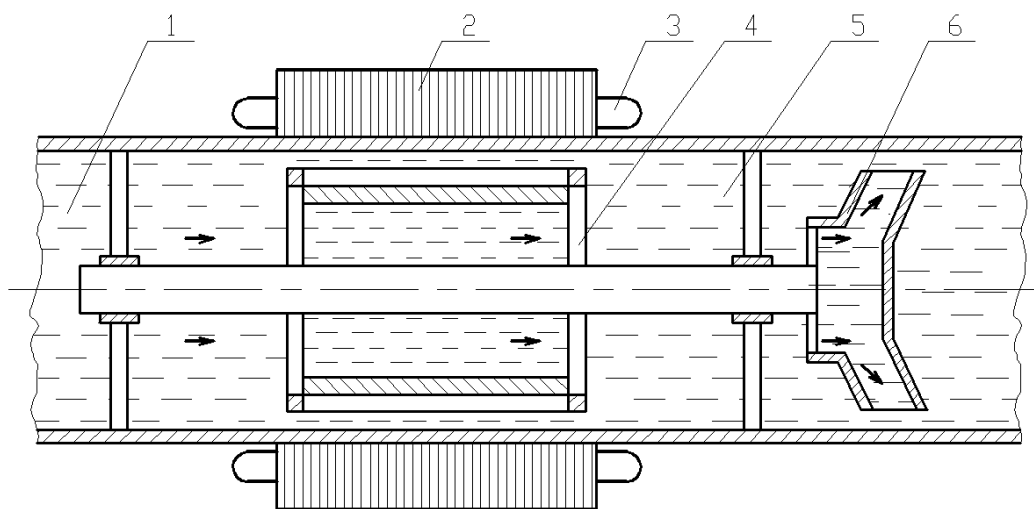


Рис. 2. Эскиз индукционного устройства для перемешивания и нагрева:
1 – внешняя труба; 2 – магнитопровод индуктора; 3 – обмотка индуктора; 4 – ротор;
5 – поток нагреваемой жидкости; 6 – лопастное колесо

Конструкция индукционного устройства для перемешивания и нагрева жидкости представляет собой систему, состоящую из многофазного цилиндрического индуктора с вращающимся магнитным полем, в расточке которого находится полый ферромагнитный цилиндр – ротор. На одной оси с ротором закреплено лопастное колесо смесителя, конструкция и методика расчета которого рассмотрены в работах [15, 16, 18]. Эскиз индукционного устройства для перемешивания и нагрева представлен на рис. 2.

Для расчета конструктивных и режимных параметров индукционного смесителя используется программный комплекс Elcut 5.9 [18]. Так как электромагнитные процессы можно считать практически безынерционными по сравнению с тепловыми, решение электромагнитной и тепловой задач выполняется раздельно, что значительно упрощает и ускоряет процедуру расчета.

Учитывая периодичность конструкции, обусловленную чередованием пазов и зубцов магнитной системы, исходную математическую модель процесса индукционного нагрева в поперечном поле осесимметричной системы тел в общем случае можно представить системой дифференциальных уравнений в частных производных вида [19–22]

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\mu_a(H(r, x, t), T)H(r, x, t))}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{1}{\sigma(T)} \frac{\partial H(r, x, t)}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sigma(T)} \frac{\partial H(r, x, t)}{\partial x} \right) &= 0; \\ \frac{\partial H(0, x, \tau)}{\partial r} &= 0; \\ c(T)\gamma \frac{\partial T(r, x, \theta, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T(r, x, \theta, \tau)}{\partial r} \right) + \\ + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(r, x, \theta, \tau)}{\partial \theta} \right) &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(r, x, \theta, \tau)}{\partial x} \right) + \frac{1}{c(T)\gamma} W(r, x, \theta, \tau). \end{aligned}$$

Здесь $H(R, L, t)$ – вектор напряженности магнитного поля;

μ_a – магнитная проницаемость;

$\sigma(T)$ – электропроводимость;

$T(r, x, \theta, \tau)$ – температурное распределение в системе сопряженных тел;

τ – время;

$\lambda(T)$ – удельная теплопроводность;

$W(r, x, \theta, \tau)$ – удельная мощность тепловыделения;

$c(T)$ – удельная теплоемкость;

γ – плотность;

θ – угловая координата.

Теплообмен между стенкой тепловыделяющего элемента и жидкостью аппроксимируется зависимостью теплового потока от аксиальной координаты x :

$q(x) = q_0 e^{-\frac{x}{L}}$, где q_0 – тепловой поток от стенки нагревателя в жидкость на входе в нагреватель.

В табл. 1 приведены исходные данные для расчета.

Исходные данные

Наименование	Усл. обозн.	Величина	Размерность
Длина секции		0,5	м
Производительность		90	т/сут
Диаметр внешней трубы		0,260	м
Толщина стенки трубы		0,008	м
Внешний диаметр ротора		0,24	м
Размер паза ротора	$A \times B$	18×12	мм
Кол-во пазов ротора	n_1	12	шт.
Внутренний диаметр ротора		0,18	м
Размер паза статора	$A \times B$	30×20	мм
Кол-во пазов статора	n_2	12	шт.
Внешний диаметр статора		0,4	м
Внутренний диаметр статора		0,266	м
Материал витков		Медь	
Материал статора		Сталь электротехническая	
Материал ротора		Сталь 45	
Материал беличьей клетки		Сплав алюминия	
Исследуемая жидкость		Нефть	
Частота	f	50	Гц

Моделирование электромагнитных процессов в значительной степени усложняется наличием многослойной структуры исследуемого объекта. Цилиндрический магнитопровод индуктора, выполненный из пакета шихтованной электротехнической стали, отделен от трубопровода слоем тепловой и электрической изоляции. Труба выполнена из немагнитной стали. Ротор, расположенный внутри трубы, представляет собой полый ферромагнитный цилиндр, в пазах которого расположена короткозамкнутая обмотка из сплава алюминия.

Ниже приводятся результаты расчета конструктивных и режимных параметров трехфазного индукционного устройства с вращающимся магнитным полем и многослойной нагрузкой и детального исследования энергетических характеристик.

При исследовании процессов преобразования электрической энергии индуктора в тепловую и механическую энергию для вращения смесителя в качестве варьируемых параметров рассматриваются частота вращения поля индуктора, напряжение на индукторе и момент нагрузки на валу смесителя. В качестве управляемых величин рассматриваются частота вращения ротора, мощность, выделяемая в стенке трубы под действием внутренних источников тепла, мощность, выделяемая в стенке ротора, механическая мощность на вращение ротора и соотношение доли мощности, выделяющейся в стенке трубы, и доли мощности на вращение ротора. Анализ всех вопросов одновременно представляет сложную

задачу, так как требуется многократное уточнение параметров при более детальном исследовании различных сторон процесса. В работе приведен анализ влияния частоты поля индуктора на величины тепловой мощности, выделяющейся в роторе, и мощности, идущей на вращение, и на соотношение между ними в зависимости от момента нагрузки на валу. В комплексе программ Elcut есть встроенный параметр, учитывающий сдвиг фаз, что значительно упрощает и постановку задачи, и ее вычисление. В то же время наличие двухслойной нагрузки индуктора с вращающимся ротором усложняет процедуру расчета параметров индуктора.

Расчет электромагнитных параметров выполнен с помощью двумерной модели. Представив систему уравнений Максвелла [23] в форме векторного магнитного потенциала A , дифференциальное уравнение электромагнитного поля в двумерной постановке можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - j\omega g A = -j_{ext}; \quad A|_L = 0. \quad (1)$$

Здесь μ_x, μ_y – относительная магнитная проницаемость материала по осям x, y ;
 x, y – координаты;
 j – мнимая единица;
 ω – круговая частота тока;
 g – удельная электрическая проводимость;
 L – граница расчетной области;
 j_{ext} – плотность стороннего тока.

Конечная система уравнений имеет вид

$$[K] \cdot \{u\} = \{I\}. \quad (2)$$

Здесь $[K], \{I\}, \{U\}$ – матрица жесткости и векторы источников и неизвестных величин.

На базе уравнений (1), (2) решается электромагнитная задача для плоской двумерной области. Результаты расчета электромагнитных параметров и вращающего момента ротора для установившегося режима работы исследуемой системы представлены на рисунках. На рис. 3 приведен график распределения плотности тока в элементах конструкции – в катушке индуктора, в стенке трубы, в короткозамкнутой обмотке ротора и в стальном теле ротора. Здесь участок № 1 – плотность тока в обмотке статора, участок № 2 – плотность тока в стенке трубы из нержавеющей стали, участок № 3 – плотность тока в беличьей клетке ротора. Отсчет расстояния ведется от дна паза магнитопровода. Как следует из полученных результатов, наибольшая плотность тока достигается в поверхностных слоях обмотки индуктора и короткозамкнутой обмотки ротора.

Небольшая плотность тока в стенке трубы из нержавеющей стали обусловлена тем, что отношение глубины проникновения тока к толщине стенки трубы значительно больше единицы, вследствие чего основная часть подводимой к индуктору энергии выделяется в роторе в виде тепла и преобразуется в механическую энергию для вращения смесителя. На рис. 4 представлены результаты расчета мощности тепловыделения в роторе, а на рис. 5 – результаты расчета полного вращающего момента ротора. Расчеты выполнены для частоты вращения поля индуктора 314 рад/с.

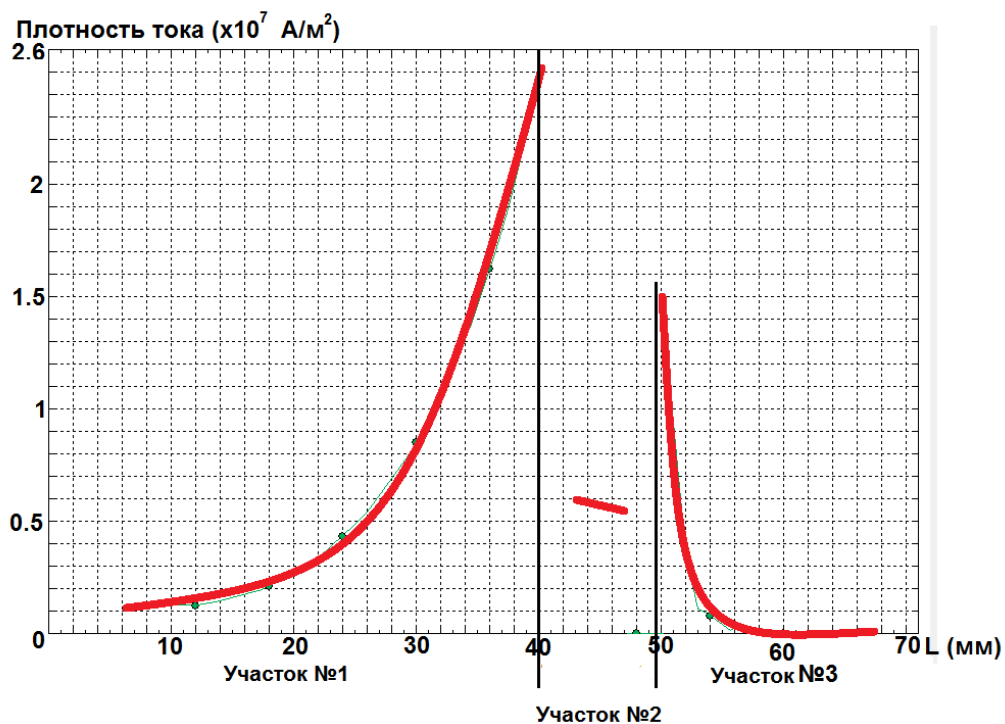


Рис. 3. График плотности тока

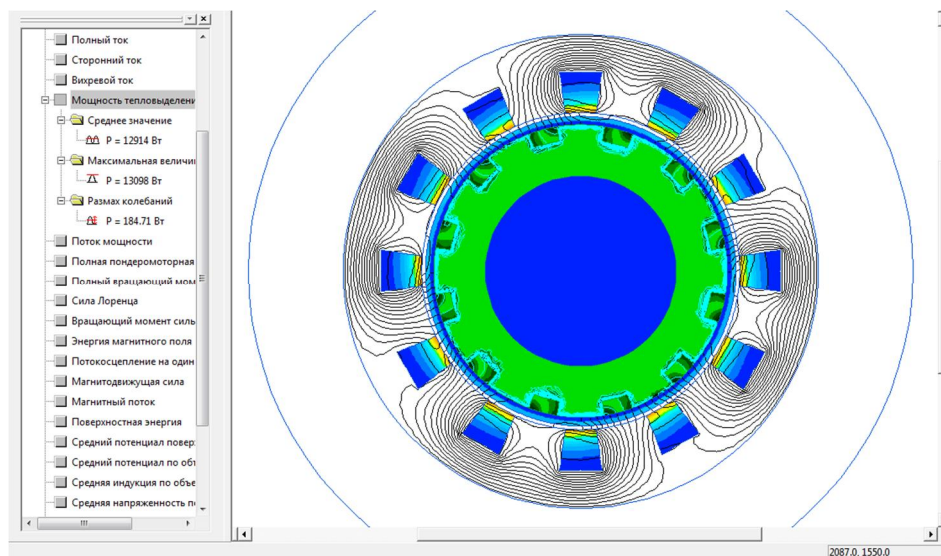


Рис. 4. Мощность тепловыделения в роторе при частоте вращения поля индуктора 314 рад/с

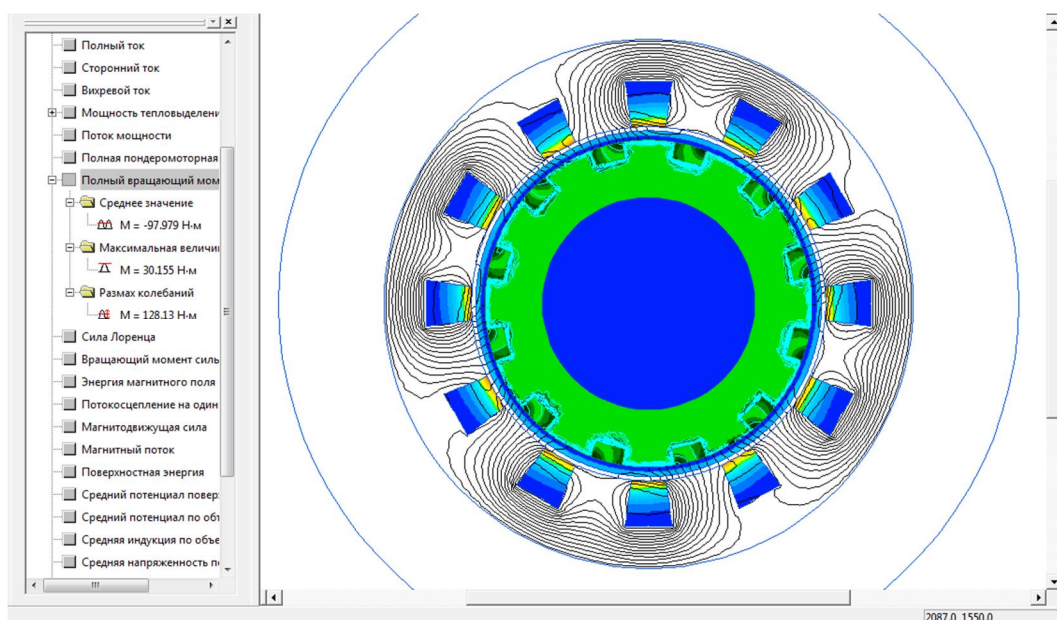


Рис. 5. Вращающий момент индуктора-смесителя при частоте вращения поля индуктора 314 рад/с

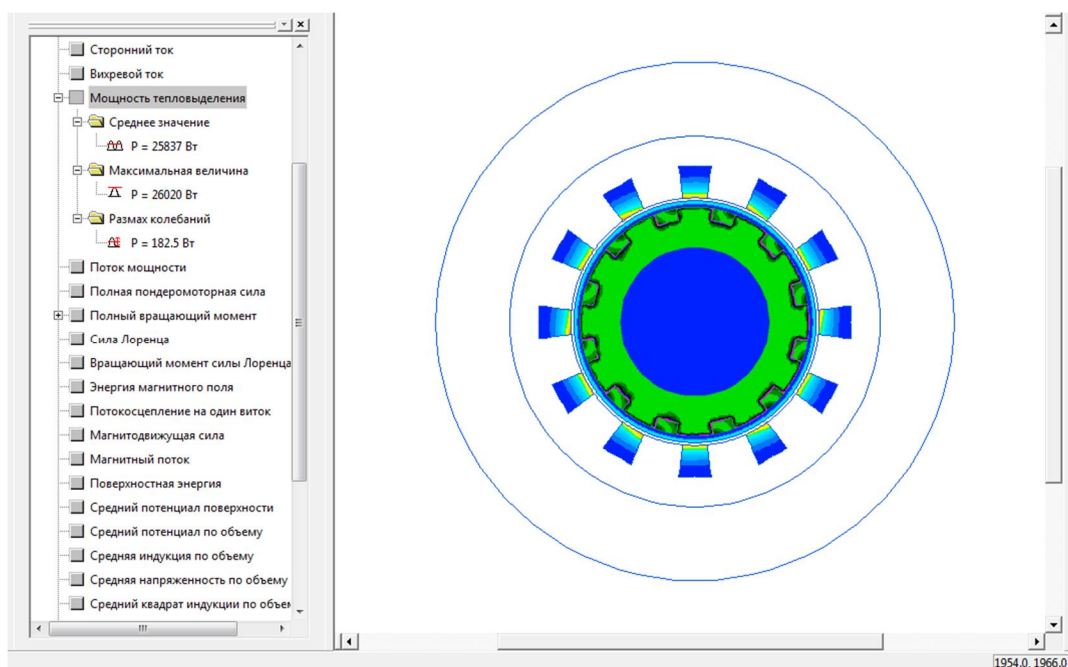


Рис. 6. Мощность тепловыделения в роторе при частоте вращения поля индуктора 157 рад/с

Для оценки эффективности устройства и соотношения между мощностью, идущей на вращение ротора, и мощностью, идущей на нагрев, был произведен расчет электрических параметров и величины вращающего момента при скоро-

сти вращения поля индуктора 157 рад/с. Как следует из сравнительного анализа, мощность тепловыделения при частоте 157 рад/с (рис. 6) уменьшилась более чем в два раза по сравнению с той же мощностью при работе на частоте 314 рад/с (см. рис. 4). В то же время вращающий момент при частоте 157 рад/с значительно увеличился (рис. 7) по сравнению с вращающим моментом на частоте 314 рад/с (см. рис. 5). Следовательно, изменение частоты поля индуктора можно использовать для выбора оптимального режима работы устройства в зависимости от реологических свойств жидкости, прежде всего от вязкости.

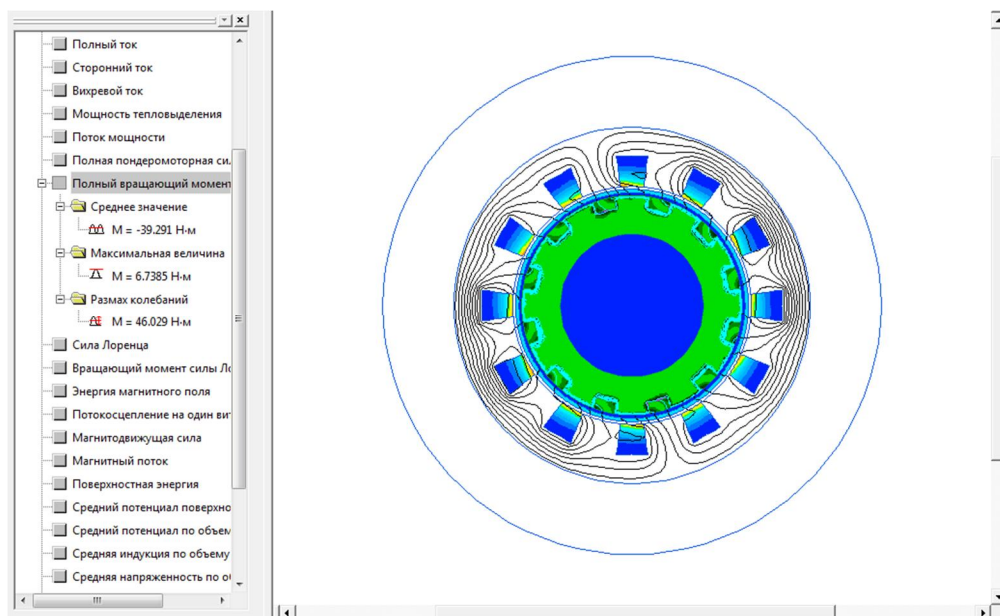


Рис. 7. Полный вращающий момент ротора при частоте вращения поля индуктора 157 рад/с

Расчеты показывают, что чем выше вязкость, тем ниже должна быть частота вращения поля, чтобы обеспечить необходимую скорость вращения смесителя при увеличении момента нагрузки.

В табл. 2 приведены сравнительные характеристики исследуемого устройства при работе на частоте 314 и 157 рад/с.

Механическая характеристика устройства приведена на рис. 8.

Таблица 2

Сравнительные характеристики смесителя

Параметр	Частота вращения поля, рад/с	
	157	314
Частота источника питания	50	50
Ток, А	6500	5400
Напряжение, В	5,27	6,27
Момент трогания, Н/м	179	87
Полная мощность, ВА	44221	43858

Параметр	Частота вращения поля, рад/с	
	157	314
Мощность реактивная, ВАр	35377	32893
Полная активная мощность, Вт	26533	31326,28
Мощность на нагрев в роторе, Вт	12914,5	21837
Мощность на нагрев в немагнитной трубе, Вт	1120	2380
Мощность на вращение, Вт	13638,5	7109,28
Доля мощности на нагрев	0,528	0,9
$\cos \varphi$	0,625	0,71

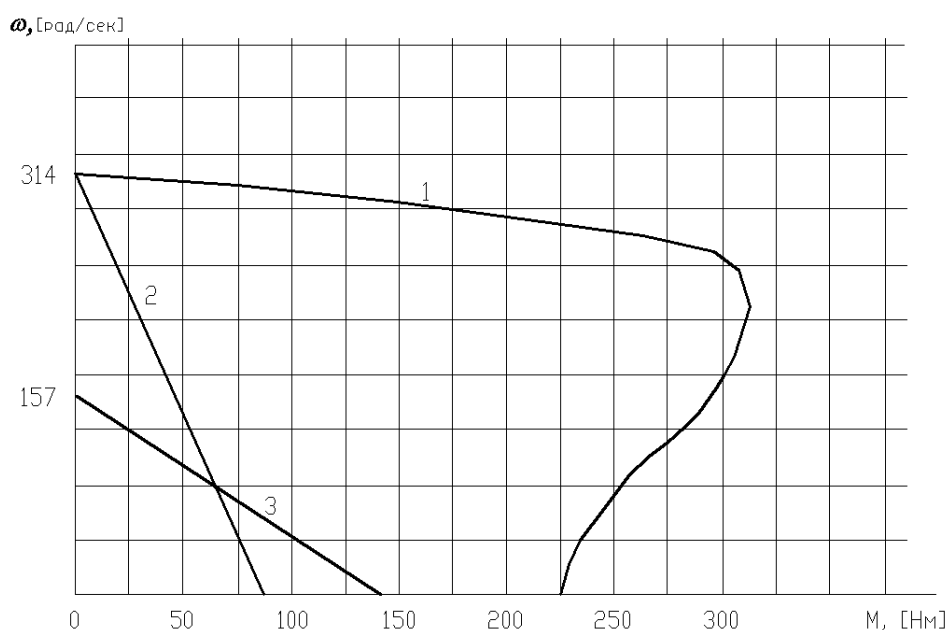


Рис. 8. Механическая характеристика смесителя:

1 – характеристика серийного асинхронного электродвигателя; 2 – характеристика индукционного смесителя с частотой вращения поля 314 рад/с; 3 – характеристика индукционного смесителя с частотой вращения поля 157 рад/с

Как следует из графика, механическая характеристика смесителя – мягкая, что обусловлено наличием большого зазора между статором и ротором. В то же время, как показывают расчеты, в зависимости от вязкости жидкости скорость вращения смесителя для параметров нефти, приведенных в табл. 1, лежит в пределах $45 \div 110$ рад/с, а момент вращения, необходимый для эффективного перемешивания, находится в диапазоне $(35 \div 140)$ Нм. Следовательно, в заданном диапазоне вязкости нагреваемой жидкости $(1 \div 4) \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ энергетические характеристики исследуемого устройства обеспечивают эффективную работу смесителя.

Выводы

С помощью разработанной численной модели исследованы энергетические характеристики трехфазного устройства, совмещающего функции нагревателя и привода вращения. Показана возможность использования трехфазного индуктора с вращающимся магнитным полем для создания вращающего момента ротора-смесителя и нагрева жидкости теплом, выделяющимся в стенке ротора. Установлена зависимость соотношения между тепловой энергией, выделяющейся в стенке ротора, и энергией, идущей на вращение ротора, от частоты вращения поля индуктора. Как следует из анализа, мощность тепловыделения в роторе увеличивается при увеличении частоты вращения поля индуктора, а вращающий момент соответственно уменьшается. Следовательно, регулированием частоты вращения поля индуктора можно устанавливать оптимальный режим работы устройства в зависимости от реологических свойств нефти, прежде всего от вязкости. Частоту вращения можно регулировать изменением схемы соединения обмоток индуктора или изменением частоты источника питания. Увеличение частоты целесообразно использовать в том случае, когда требуется более эффективный нагрев, а понижение – при необходимости получить максимальный вращающий момент для интенсивного перемешивания. В то же время необходимо отметить, что независимо от частоты вращения поля индуктора вся энергия, передаваемая в ротор, в конечном итоге расходуется на нагрев жидкости, т. е. общий коэффициент полезного действия устройства близок к единице.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1969. – 529 с.
2. Альтикуль А.Д., Киселёв П.Г. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1965. – 273 с.
3. Вильнер Я.М., Ковалев Я.Т., Некрасов Б.Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. – Минск: Вышейш. школа, 1976. – 416 с.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидросопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
5. Тузунов П.И. Нестационарные режимы перекачки нефти и нефтепродуктов. – М.: Недра, 1984. – 224 с.
6. Фонарев З.И. Электроподогрев трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования в нефтяной промышленности. – Л.: Недра, 1984. – 148 с.
7. Струтинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. – М.: Инфра-Инженерия, 2015. – 272 с.
8. Индукционные котлы EXPRO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://protek.if.ua/induct-boilers.html>
9. Данилушкин А.И., Базаров А.А., Зиннатуллин Д.А. Исследование электромагнитных и тепловых полей в установке технологического нагрева нефти // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2004. – Вып. 24. – С. 171–173.
10. Базаров А.А. Система индукционного нагрева движущейся жидкости // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2005. – № 37. – С. 12–17.
11. 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. Сер. Технические науки. – 2017. – № 3(55). – С. 50–60.
12. Данилушкин В.А. Оптимизация конструкции и режимов работы индукционных подогревателей высоковязких нефтей при транспортировке по трубопроводам // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2004. – № 20. – С. 176–179.
13. Данилушкин В.А., Васильев И.В. Проектирование индукционной системы минимальной длины для нагрева жидкости // Евразийский союз ученых (ЕСУ). – 2015. – № 10(19). – Ч. 2. – С. 58–60.
14. Данилушкин А.И., Кривошеев В.Е., Васильев И.В. Многосекционная установка косвенного индукционного нагрева жидкости // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2018. – Вып. 1 (57). – С. 92–101.

15. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 424 с.
16. Башуров Б.П. Судовые насосы и вентиляторы. – В/О Мортехреклама, 1983. – 32 с.
17. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Пименов Д.Н. Решение полевых задач при проектировании индуктора с магнитопроводом // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – Вып. 1 (45). – С. 92–101.
18. Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – Самара: Самарский Дом печати, 2003. – 336 с.
19. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.9. – СПб.: Производственный кооператив TOP, 2009.
20. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 280 с.
21. Лыков А.В. Тепломассообмен (Справочник). – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
22. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
23. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 415 с.

Статья поступила в редакцию 3 июля 2019 года

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A THREE-PHASE INDUCTION DEVICE FOR HEATING AND MIXING LIQUIDS

A.I. Danilushkin, V.A. Danilushkin, M.A. Maximova, D.V. Surkov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

Abstract. The questions of the development of design and operating parameters of a three-phase induction device combining the functions of heating and mixing viscous liquids, in particular oil and viscous oil products, are considered. Specific features of the process of transporting viscous fluids through pipelines are noted. It is shown that the high viscosity of the pumped fluids leads to high energy costs. One way to reduce energy consumption is to heat the liquid before transporting it. To increase the intensity of heat transfer between the pipe wall and the heated fluid stream, an induction device built into the pipeline system is proposed that simultaneously performs the function of driving the rotation of the mixer wheel and the heating device. The results of a numerical calculation of the electrical parameters of the device are presented. It is shown that the power supplied to the inductor is distributed into two flows - the power of internal heat generation in the rotor wall and the power of rotation of the rotor. The relationship between the thermal energy released in the rotor wall and the energy used to rotate the rotor on the frequency of rotation of the inductor field is established. Calculations showed that an increase in frequency leads to an increase in the fraction of power for heating, and a decrease in frequency leads to an increase in torque. The resulting conclusion allows you to use the frequency to select the effective mode of operation of the mixer. The proposed device is advisable to use in multi-section heating systems in order to optimize the design and operating parameters of a multi-section heater.

Keywords: induction heating, mathematical model, pipeline transport, viscosity, current density, power, temperature, torque

Alexander I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vasily A. Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Marina A. Maximova, Graduate Student.
Dmitry V. Surkov, Graduate Student.

REFERENCES

1. *Povkh I.L.* Technical hydromechanics. – L.: Mechanical Engineering, 1969. – 529 p.
2. *Altshul D.A., Kiselev P.G.* Hydraulics and aerodynamics. – M.: Stroyizdat, 1965. – 273 p.
3. *Vilner M.Ya., Kovalev Y.T., Nekrasov B.B.* Handbook of hydraulics, the hydraulic machines and hydraulic drives. – Minsk: Visas. School, 1976. – 416 p.
4. *Idelchik I.E.* Handbook of hydraulic resistance. – Moscow: Mechanical engineering, 1992. – 672 p.
5. *Chugunov P.I.* Unsteady pumping oil and petroleum products. – Moscow: Nedra, 1984. – 224 p.
6. *Fonarev Z.I.* Electric Heating of pipelines, tanks and process equipment in the oil industry. – L.: Nedra, 1984. – 148 p.
7. *Strupinsky M.L., Khrenkov N.N., Kuvaldin A.B.* Design and operation of electric heating systems in the oil and gas industry. – M.: Infra-Engineering, 2015. – 272 p.
8. Induction boilers EXPRO [Electronic resource]. – Mode of access: <http://protek.if.ua/induct-boilers.html>
9. *Danilushkin A.I., Bazarov A.A., Zinnatulin D.A.* Investigation of electromagnetic and thermal fields in the installation of technological heating of oil // Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences. – 2004. – Vol. 24. – pp. 171–173.
10. *Bazarov A.A.* System of induction heating of a moving liquid // Bulletin Of Samara State Technical University. Ser. Technical Sciences. – 2005. No. 37. – pp. 12–17.
11. *Bazarov A.A., Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Vasiliev I.V.* Modeling of electromagnetic processes in multilayer three-phase induction cylindrical system // Bulletin of Samara State Technical University. Ser. Technical Sciences. 2017. No. 3(55). – pp. 50–60.
12. *Danilushkin V.A.* Optimization of design and operation modes of induction heaters of high-viscosity oils during transportation through pipelines // Bulletin of Samara State Technical University. Ser. Technical Sciences. – 2004. – No. 20. – P. 176–179.
13. *Danilushkin V.A., Vasiliev I.V.* Design of induction system of minimum length for liquid heating // Eurasian Union of scientists (ESU). – 2015. – № 10(19). – P. 2. – pp. 58–60.
14. *Danilushkin A.I., Krivosheev V.E., Vasiliev I.V.* Multisection installation of indirect induction heating of liquid // Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences. 2018. Issue. No. 1 (57). P. 92–101.
15. *Cherkassky V.M.* Pumps, fans, compressors. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 424 c.
16. *Bashurov B.P.* Ship pumps and fans. – I/O Marterella, 1983. – 32 c.
17. *Belousov A.N., Musatkin N.F., Radko V.M.* Theory and calculation of aircraft shovel machines. – Samara: Samara house press, 2003. – 336 p.
18. ELCUT. Modeling of two-dimensional fields by finite element method. User manual. Version 5.9. SPb.: TOR production cooperative, 2009.
19. *Nemkov V.S., Demidovich V.B.* Theory and calculation of induction heating devices. – L.: Energoatomizdat, Leningrad. otd-nie, 1988. – 280 p.
20. *Lykov A.V.* Heat And Mass Transfer (Reference). – M.: Energy, 1978. – 480 p.
21. *Rapoport E.Ya.* Optimal control of systems with distributed parameters. – M.: Higher school, 2009. – 677 c.