

# Электротехника

УДК 621.365

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ

*А.И. Данилушкин, В.А. Данилушкин\**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: aidanilushkin@mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается проблема разработки и исследования индукционной системы для нагрева вязких неэлектропроводных жидкостей в процессе транспортировки по трубопроводам. Специфической особенностью объекта исследования является сочетание процессов нагрева ламинарного потока жидкости в цилиндрическом индукторе и перемешивания в трехфазном индукторе – смесителе. Выполнены исследования взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и электромеханических процессов в системах нагрева и перемешивания. Представлены результаты численного расчета электромагнитных и тепловых полей и электромагнитного момента вращения ротора в нагреваемой жидкости. Установлена связь между тепловой мощностью, выделяемой в элементах системы, и мощностью, идущей на вращение ротора. Приведены электромеханические (регулируемые) характеристики индукционного смесителя. Показано, что при соответствующем выборе конструктивных и режимных параметров индукционной системы можно найти требуемое соотношение между тепловой мощностью, выделяемой в элементах системы, и мощностью, идущей на перемешивание жидкости. Результаты проведенных исследований предназначены для решения задач проектирования конструкции индукционных систем для нагрева вязких жидкостей и эффективного управления процессом нагрева.

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, математическая модель, теплообмен, температурное распределение, трубопроводный транспорт, управление, энергоэффективность.

Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами транспорта, в частности с перевозками по железной дороге, автоцистернами. Он более экономичен, безопасен и экологичен. Выигрыш в себестоимости по разным оценкам достигает 3–4-кратной величины, включая меньшие потери нефти.

---

\* Александр Иванович Данилушкин, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», доктор технических наук, профессор.  
Василий Александрович Данилушкин, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», кандидат технических наук, доцент.

Эффективность трубопроводного транспорта зависит от ряда факторов. К ним относится вязкость перекачиваемого продукта, от которой зависит производительность трубопроводной системы и энергозатраты на перекачку [1–4]. Одним из эффективных способов снижения энергозатрат на компримирование и увеличения пропускной способности трубопровода является снижение величины вязкости жидкости путем периодического подогрева с помощью путевых подогревателей, устанавливаемых с определенным интервалом вдоль магистрали. Подогрев осуществляется различными способами. Наиболее надежным и экологически чистым способом подогрева высоковязких и высокозастывающих нефтей в настоящее время является электроподогрев [6, 7].

В работах [5–9] рассматриваются вопросы расчета, проектирования и практического применения систем электрообогрева трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования в нефтегазовой промышленности. Приведены описание и характеристики установок электрообогрева, работающих в различных отраслях промышленности. Однако вопросы моделирования и расчета охватывают ограниченный класс нагревателей с источниками энергии в виде греющих кабелей или индукционных систем с однослойной нагрузкой в виде металлической стенки резервуара или трубопровода.

В работах [10, 11] рассмотрена конструкция индукционного нагревателя для транспортировки высоковязких нефтей по магистральным трубопроводным системам. Предлагаемая конструкция нагревателя с осесимметричными трубами, в которых внутренняя труба служит в качестве вытеснителя, позволяет вдвое увеличить площадь теплообмена при минимальном поперечном сечении потока жидкости.

В работе [12, 13] выполнены исследования электромагнитных и тепловых процессов в установке технологического нагрева нефти при транспортировке по трубопроводам. Предложена конструкция многосекционного индукционного нагревателя для транспортировки высоковязких жидкостей, в частности высокопарафинистых нефтей. Показано, что вследствие низкой теплопроводности и высокой вязкости нефти при наличии технологических ограничений на максимальную температуру контактирующих поверхностей трубы и жидкости для трубопроводных систем высокой производительности индукционные нагреватели должны иметь несколько автономных секций с развитой поверхностью теплообмена.

Как следует из результатов исследований, такие свойства транспортируемой жидкости, как высокая вязкость, исключая возможность создания турбулентности при технологически возможных скоростях потока, и низкая теплопроводность обуславливают необходимость применения многосекционных индукционных нагревателей, длина которых составляет  $12 \div 16$  м при требуемой температуре на выходе  $50 \div 60$  град. [11, 13]. Задача усложняется наличием дополнительного ограничения на максимальную температуру пограничных, наиболее нагретых слоев жидкости.

Решение задачи снижения массогабаритных показателей и повышения эффективности индукционных нагревательных устройств возможно за счет интенсификации процесса теплообмена между источниками тепла и нагреваемой жидкостью. Интенсифицировать процесс теплообмена и таким образом повысить эффективность нагревательной системы можно либо путем создания турбулентности потока за счет высоких скоростей, либо путем перемешивания жидкости в нагреваемом потоке [14–17]. При практически реализуемых скоростях потока

нефти в трубопроводных системах имеет место ламинарное течение жидкости [17]. Средняя скорость потока составляет 2,8–3,3 м/с, причем вследствие высокой вязкости скорость по сечению потока распределена существенно неравномерно. Высокая скорость в средней части потока быстро падает к стенкам трубы. Пристенные слои потока прилипают к стенкам, а значительная величина вязкости способствует высоким касательным напряжениям между слоями и их торможению. При таких условиях создать турбулентность не представляется возможным.

Наиболее целесообразными в создавшейся ситуации являются разработка и применение многосекционной системы нагрева, которая состоит из чередующихся секций нагрева и перемешивания, соединенных последовательно (рис. 1).

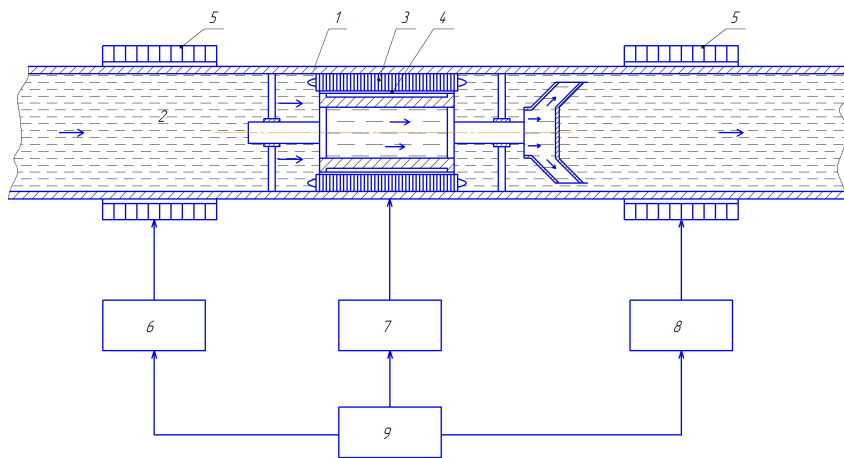


Рис. 1. Схема нагревательного модуля: 1 – трубопровод; 2 – нагреваемая жидкость; 3 – статор трехфазного индуктора; 4 – ротор; 5 – однофазные индукторы; 6, 7, 8 – регулируемые источники питания; 9 – система управления нагревом

В работе [18] рассмотрено устройство для нагрева и перемешивания вязкой жидкости, включающее наряду с индукционными нагревателями трехфазный индуктор-смеситель. Трехфазный индуктор расположен на трубе, в которой находится полый ротор с крыльчаткой смесителя.

Электрическая энергия, подводимая к индуктору, преобразуется в тепловую энергию в стенке трубы и в механическую энергию для перемешивания жидкости. Перемешивание жидкости осуществляется за счет вращения ротора под воздействием трехфазного электромагнитного поля статора. При этом часть энергии, передаваемой индуктором, выделяется в виде тепла в роторе, обеспечивая дополнительный подогрев жидкости.

Изменением частоты и напряжения источника питания можно регулировать соотношение между мощностью, идущей на нагрев, и мощностью, идущей на вращение крыльчатки. Однако наличие стальной трубы между статором и полым ротором существенно ограничивает диапазон регулирования этого соотношения. Кроме того, предложенное устройство имеет низкий коэффициент мощности и мягкую электромеханическую характеристику вращающего устройства, не позволяющую обеспечить необходимый диапазон регулирования частоты вращения крыльчатки смесителя при изменении производительности трубопровода или вязкости перекачиваемой жидкости.

В настоящей работе рассматривается новая конструкция устройства для нагрева и перемешивания, которая имеет высокий коэффициент мощности и одновременно повышает диапазон регулирования частоты вращения крыльчатки смесителя и связанное с этим соотношение между мощностью, идущей на нагрев, и мощностью на перемешивание. На рис. 2 представлен эскиз предлагаемой конструкции трехфазного индуктора.

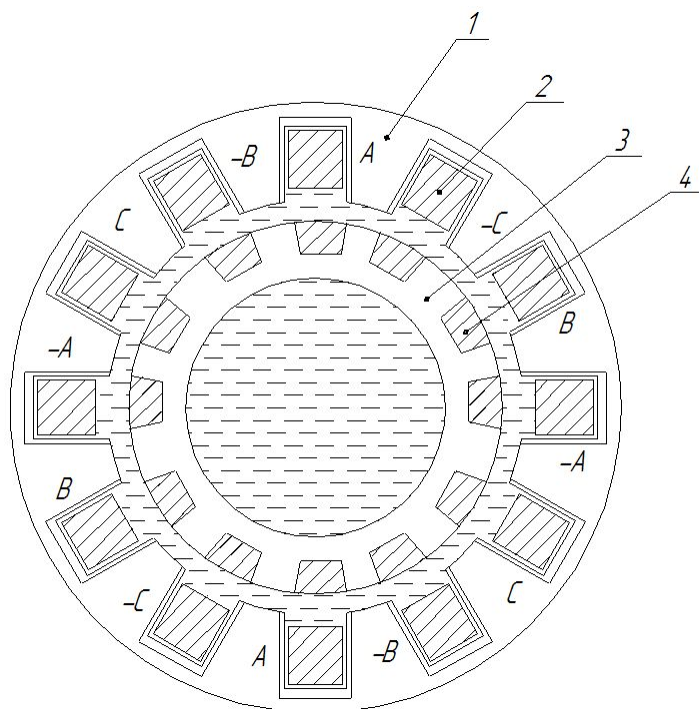


Рис. 2. Трехфазный индуктор с магнитопроводом:  
1 – магнитопровод; 2 – обмотка статора; 3 – ротор; 4 – обмотка ротора

Для перемешивания слоев используется трехлопастная полая крыльчатка диагональной конструкции [19–21]. Центральная часть потока жидкости в полой крыльчатке лопастного колеса отклоняется к стенке трубы. Таким образом, объем жидкости, вошедший в лопастное колесо, попадает в пристенную область, вытесняя разогретый слой. Температура пристенного слоя снижается. Таким образом обеспечивается более интенсивная теплоотдача в жидкость. При этом вся энергия, подведенная к индуктору смесителя, также в конечном итоге преобразуется в тепло, обеспечивая дополнительный нагрев жидкости.

В следующей секции после смесителя пристенный слой жидкости вновь нагревается индуктором. В процессе перемешивания температура жидкости по сечению потока усредняется, и на входе следующего модуля температура пристенного слоя жидкости оказывается значительно ниже, чем температура стенки трубы. За нагревательной секцией процессы перемешивания и нагрева повторяются. Число модулей определяется производительностью трубопровода, вязкостью нефти и температурным режимом.

Такой способ, совмещающий нагрев и перемешивание в одном устройстве, позволяет значительно ускорить процесс нагрева жидкости с низкой теплопроводностью и уменьшить общую длину нагревателя. Соотношение между мощно-

стью нагрева и мощностью, идущей на вращение крыльчатки смесителя и перемешивание жидкости, зависит от частоты тока источника питания, реологических свойств транспортируемой жидкости, электрофизических свойств материала и конструктивных параметров системы.

Для расчета конструктивных и режимных параметров нагревательной системы учетом специфики предлагаемого устройства используется программный комплекс Comsol 5.2.

Так как электромагнитные процессы можно считать практически безынерционными по сравнению с тепловыми, решение электромагнитной и тепловой задач выполняется отдельно, что значительно упрощает и ускоряет процедуру расчета.

Учитывая периодичность конструкции, обусловленную чередованием пазов и зубцов магнитной системы, исходную математическую модель процесса индукционного нагрева в общем случае можно представить системой дифференциальных уравнений в частных производных для электромагнитного и теплового полей соответственно [11–13]:

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

Здесь  $H(R,L,t)$  – вектор напряженности магнитного поля;  $\mu_a$  – магнитная проницаемость;  $\sigma(T)$  – электропроводимость;  $\partial T(r,x,\theta,\tau)$  – температурное распределение в системе сопряженных тел;  $\tau$  – время;  $\lambda(T)$  – удельная теплопроводность;  $W(r,x,\theta,\tau)$  – удельная мощность тепловыделения;  $c(T)$  – удельная теплоемкость;  $\gamma$  – плотность,  $\theta$  – угловая координата.

В качестве исходных данных для решения электромагнитной задачи вводятся: свойства сред, источники поля, распределенные и сосредоточенные токи, граничные условия, конструктивные параметры нагревателя, электрофизические характеристики материала труб, параметры индуктирующей катушки, размеры и характеристики магнитопровода, энергетические параметры – напряжение питания, частота тока.

Основными расчетными параметрами являются изменяющиеся во времени магнитный потенциал, магнитная индукция, напряженность поля, плотности токов, удельная тепловая мощность, вращающий момент.

Для расчета интегральных параметров индукционной системы использовалась двумерная постановка электромагнитной задачи в форме системы дифференциальных уравнений. Перейдя от системы уравнений Максвелла к формули-

ровке с использованием векторного магнитного потенциала, можно записать дифференциальное уравнение с соответствующими граничными условиями

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

Здесь:  $A$  – векторный магнитный потенциал;  $\mu_x, \mu_y$  – относительная магнитная проницаемость материала по осям  $x, y$ ;  $j$  – мнимая единица;  $\omega$  – круговая частота тока;  $g$  – удельная электрическая проводимость;  $L$  – граница расчетной области (линия удаленной поверхности);  $j_{ext}$  – плотность стороннего тока. На базе приведенных систем уравнений строится конечно-элементная формулировка для плоской двумерной области [23].

Граница раздела магнитных сред описывается системой соотношений:

$$\begin{aligned} B_{1n} &= B_{2n}; \\ \mu_1 H_{1n} &= \mu_2 H_{2n}; \\ H_{1\tau} - H_{2\tau} &= \frac{dI}{dl}. \end{aligned}$$

Последнее выражение учитывает скачкообразное изменение вектора напряженности  $\{\bar{H}\}$  на границе раздела сред. Кроме условий сопряжения для получения однозначного решения уравнений Максвелла в форме напряженности электрического поля  $\{\bar{E}\}$  и напряженности магнитного поля  $\{\bar{H}\}$  в области  $Q \subset R^3$  с границей  $S$  необходимо задать:

– уравнения поверхностей, отделяющих друг от друга среды  $i$  и  $j$ ,  $f_{ij}(x, y, z) = 0$ ;

– начальные величины  $E_0(x, y, z)$ ,  $H_0(x, y, z)$  в момент времени  $t_0$  в произвольной точке исследуемого объема  $Q \subset R^3$  с границей  $S$ ;

– касательные составляющие вектора  $\bar{E}$  или  $\bar{H}$  в произвольной точке поверхности в произвольном временном интервале от  $t_0$  до  $t$ , или распределения полей  $\bar{E}$  и  $\bar{H}$  вне исследуемого объема  $Q$ ;

– функциональные зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  и удельной проводимости  $\gamma$  от пространственных координат или от напряженности поля.

Решение задачи электромагнитного поля достигается использованием векторного магнитного потенциала  $\{A\}$  и скалярного электрического потенциала  $V$ , которые выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \{\bar{B}\} &= \text{rot}\{\bar{A}\}; \\ \{\bar{E}\} &= -\left\{ \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right\} - \text{div}V. \end{aligned}$$

Чтобы функция  $\{\bar{A}\}$  была определена, нужно определить значение ее дивергенции. Для этого добавляется условие, которое называется калибровкой Кулона:

$$\text{div}\{\bar{A}\} = 0.$$

В результате получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \left( \frac{1}{[\mu]} \operatorname{rot} \{ \bar{A} \} \right) + [\sigma] \frac{\partial \{ \bar{A} \}}{\partial t} &= \{ \bar{J} \}; \\ \operatorname{rot} \{ \bar{A} \} &= \{ \bar{B} \}; \\ \operatorname{div} \{ \bar{A} \} &= 0. \end{aligned}$$

Используя соотношение

$$\operatorname{rot} \left( \operatorname{rot} \{ \bar{A} \} \right) = \operatorname{grad} \left( \operatorname{div} \{ \bar{A} \} \right) - \nabla^2 \{ \bar{A} \},$$

при  $\mu = \text{const}$  получим уравнение

$$\nabla^2 \{ \bar{A} \} - j\omega\sigma \{ \bar{A} \} - \{ \bar{J} \} = 0.$$

Уравнение Пуассона дополняется граничными условиями Дирихле и Неймана на различных участках границы:

$$\{ \bar{A} \} = 0 \text{ на } S_1; \quad \frac{\partial \{ \bar{A} \}}{\partial n} = 0 \text{ на } S_2.$$

Для учета нелинейной зависимости  $\mu_a(H)$  в ферромагнитных областях используется итерационный алгоритм многократного решения результирующей системы уравнений. В начальной стадии расчета задается значение  $\mu = \text{const}$  по всей области ферромагнитных макроэлементов, затем вычисляются распределенные параметры поля, что позволяет на следующей стадии расчета корректировать  $\mu$  внутри каждого конечного элемента в зависимости от значения напряженности магнитного поля в данной области.

Численные эксперименты выполнены для устройства с параметрами, приведенными в табл. 1.

Полученные результаты позволяют выполнить анализ зависимости электромагнитных параметров индуктора – индукции магнитопровода, плотности тока в проводниках, объемной мощности тепловыделения в металлических элементах конструкции, вращающего момента и других характеристик – от геометрических и электрофизических характеристик системы, частоты и напряжения источника питания. На основании всестороннего анализа полученных зависимостей устанавливается закономерность и степень влияния электрических и геометрических параметров на энергетические характеристики системы. Полученные закономерности далее могут быть использованы при решении задачи выбора оптимальных параметров системы, обеспечивающей требуемые эксплуатационные характеристики в стационарных режимах работы установки.

На рис. 3 показано распределение плотности тока в элементах конструкции – в катушке индуктора, короткозамкнутой обмотке ротора и стальном теле ротора. Как следует из полученных результатов, наибольшая плотность тока достигается в поверхностных слоях обмотки индуктора и короткозамкнутой обмотки ротора.

## Исходные данные

| Наименование                                  | Величина                 |
|---|--------------------------|
| Диаметр трубы, мм                             | 169                      |
| Материал трубы, мм                            | Нержавеющая сталь        |
| Толщина стенки трубы, мм                      | 4,5                      |
| Диаметр цилиндрического ротора внешний, мм    | 82                       |
| Толщина стенки цилиндра, мм                   | 12                       |
| Диаметр цилиндрического ротора внутренний, мм | 58                       |
| Материал цилиндрического ротора               | Ферромагнитная сталь     |
| Размер паза (высота×ширина), мм               | 4×7                      |
| Размер зуба (высота×ширина), мм               | 4×7                      |
| Обмотка ротора                                | Шинка алюминиевая, 4×6   |
| Количество пазов, шт.                         | 12                       |
| Диаметр вала, мм                              | 20                       |
| Диаметр статора внутренний, мм                | 86                       |
| Диаметр статора внешний, мм                   | 158                      |
| Материал статора                              | Электротехническая сталь |
| Длина статора, мм                             | 400                      |
| Размер паза (высота×ширина), мм               | 16×10                    |
| Размер зуба (высота×ширина), мм               | 16×10                    |
| Частота тока индуктора, Гц                    | 50                       |
| Кол-во пазов, шт.                             | 12                       |

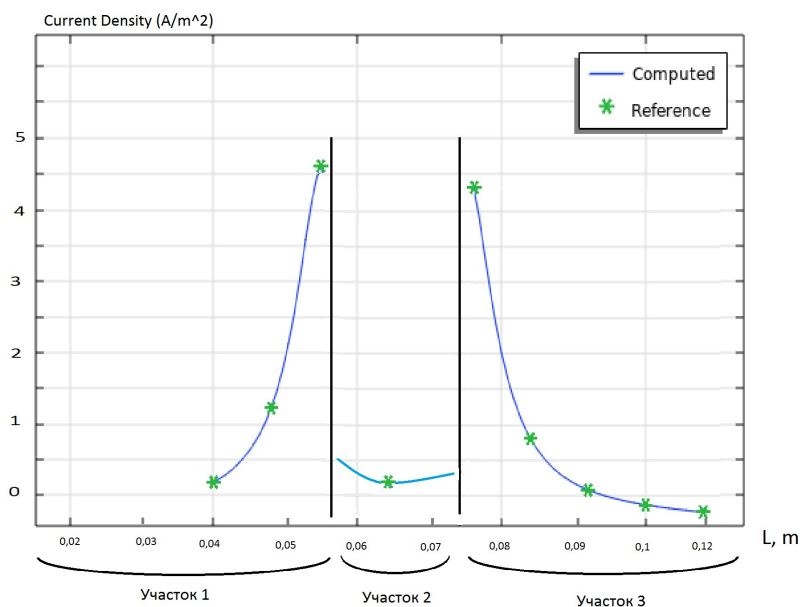


Рис. 3. Распределение плотности тока в элементах конструкции:  
1 – в катушке индуктора; 2 – в короткозамкнутой обмотке ротора;  
3 – в стальном теле ротора

В табл. 2 приведены интегральные характеристики исследуемого устройства. Коэффициент мощности индуктора при размещении статора внутри трубы увеличился по сравнению с известным аналогом в 2,7 раза и составил 0,65.



## Характеристики трехфазного индуктора

|   |        |
|---|--------|
| Частота источника питания                           | 50     |
| Ток, А  | 6300   |
| Напряжение, В                                       | 4,9    |
| Момент, Н/м, кз                                     | 106,9  |
| Частота вращения, об/мин, идеального холостого хода | 314    |
| Полная мощность, ВА                                 | 39 633 |
| Мощность реактивная, ВАр                            | 31 300 |
| Полная активная мощность, Вт                        | 26 372 |
| Мощность на нагрев в роторе, Вт                     | 15652  |
| Мощность на вращение, Вт                            | 10 744 |
| Доля мощности на нагрев                             | 0,44   |
| $\cos \varphi$                                      | 0,65   |

Ниже приведены полученные в результате расчета электромагнитной задачи электромеханические характеристики трехфазного индуктора на рабочих частотах 50, 39 и 28 Гц. Как следует из результатов расчета и приведенных диаграмм (рис. 4), исследуемая конструкция имеет жесткую механическую характеристику, что позволяет обеспечить достаточно широкий диапазон регулирования частоты вращения.

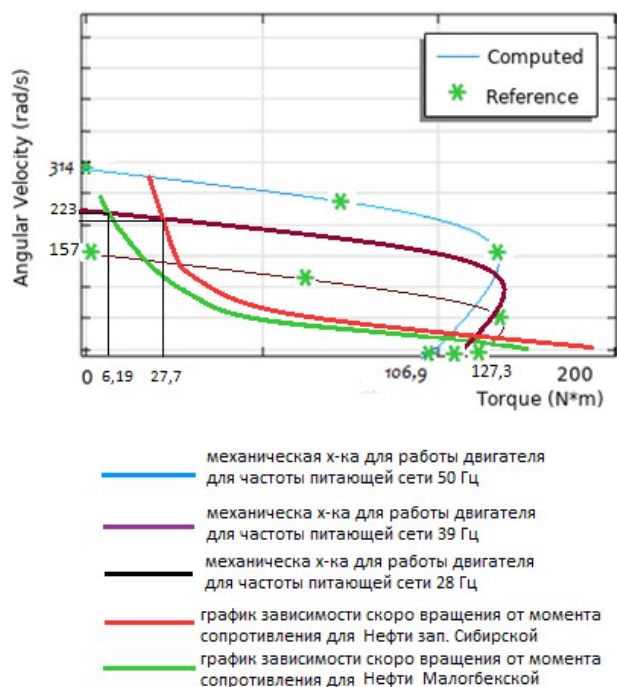


Рис. 4. Механические характеристики трехфазного индуктора

Величина диапазона регулирования частоты вращения ротора играет решающую роль при выборе оптимального режима работы смесителя в зависимости от изменения производительности трубопровода и вязкости нефти. Еще одно

преимущество заключается в возможности регулировать соотношение между мощностью, идущей на нагрев, и мощностью на вращение крыльчатки смесителя.

На этом же рисунке показаны нагрузочные характеристики исполнительного механизма (смесителя) в зависимости от вязкости нефти.

Еще одна проблема заключается в согласовании электромеханических характеристик трехфазного индуктора с характеристиками смесителя. Сложность состоит в отсутствии методики расчета момента вращения осевой крыльчатки в вязких средах. Необходимый для перемешивания нефти момент вращения рассчитывается по методике, предложенной в работе [23, 24]. Методика расчета основана на использовании коэффициентов приведения, устанавливающих связь между моментом вращения в воде и моментом вращения в вязкой среде. Алгоритм расчета представлен на рис. 5. На первом этапе выполняется расчет по методике, в которой в качестве рабочей жидкости рассматривается вода. Затем с использованием коэффициентов приведения производится пересчет мощности и момента для вязкой жидкости с учетом ее реальных характеристик.

Исходные данные, необходимые для расчета, приведены в табл. 3.

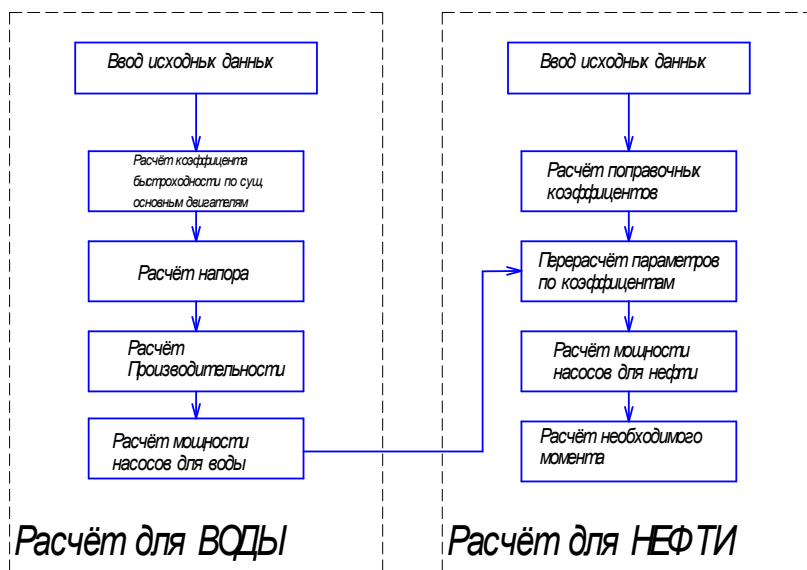


Рис. 5. Алгоритм расчета мощности и момента вращения

По исходным данным определяется напор, создаваемый насосом

$$H_{oc} = \frac{v_k^2}{2gk_n^2}$$

и скорость

$$V_c = k_v \sqrt{2gH_{oc}},$$

где  $K_n^2 = 0,0244n_s^{0,66}$ ,  $n_s$  – коэффициент быстроходности.

Таблица 3

**Исходные данные для расчета момента вращения**

| Наименование                    | Величина | Размерность         | Обозначение |
|---------------------------------|----------|---------------------|-------------|
| Скорость потока до установки    | 0,05     | м/с                 | $v_n$       |
| Скорость потока после установки | 0,1      | м/с                 | $v_k$       |
| Давление потока до установки    | 10       | кгс/см <sup>2</sup> | $p_n$       |
| Давление потока после установки | 12       | кгс/см <sup>2</sup> | $p_k$       |
| Коэффициент быстроходности      | 30       |                     | $n_s$       |
| Угловая скорость                | 37       | рад/с               | $\omega$    |
| Плотность среды (вода)          | 1000     | кг/м <sup>3</sup>   | $\rho_v$    |
| Плотность среды (нефть)         | 920      | кг/м <sup>3</sup>   | $\rho_n$    |
| Вязкость (нефть)                | 4,5      | см/сек <sup>2</sup> | $\nu$       |

Полезная мощность:

$$P_{пол} = \frac{Q_{ид} \rho_v g H_{oc}}{102},$$

где  $Q_{ид}$  – идеальная подача осевого насоса:

$$Q_{ид} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) V_z,$$

где  $D$  – диаметр колеса;  $d$  – рекомендуемый диаметр ступицы;  $V_z$  – осевая скорость;  $d = (0,4 \dots 0,5)D$ ;  $V_z = k_v \sqrt{2gH_{oc}}$ ;  $k_v = 0,055n_s^{0,66}$ .

Мощность установки с учетом потерь:

$$P = 1,2P_{пол}.$$

Для перерасчета параметров используются дополнительные конструктивные характеристики, приведенные в табл. 4.

Таблица 4

**Данные для перерасчета на нефть**

| Наименование        | Величина | Размерность | Обозначение |
|---------------------|----------|-------------|-------------|
| Толщина лопатки     | 0,03     | м           | $b$         |
| Ширина лопатки      | 0,25     | м           | $q$         |
| Число рядов лопаток | 2        | шт.         | $z$         |

Определяется коэффициент стеснения:

$$K_2 = \frac{\pi D - qz}{\pi D} = \frac{t_2 - q}{t_2},$$

где  $t_2$  – шаг лопаток.

Эквивалентный диаметр рабочего колеса:

$$D_{2экр} = \sqrt{4dbK_2}.$$

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

$$Re = \frac{Q_p}{D_{2экв} \nu}$$

Дальнейший расчет выполняется с помощью опытных поправочных коэффициентов  $K_n$ ,  $K_q$ ,  $K_\eta$ , которые при найденных числах Рейнольдса находятся из графика [23, 24] (рис. 6).

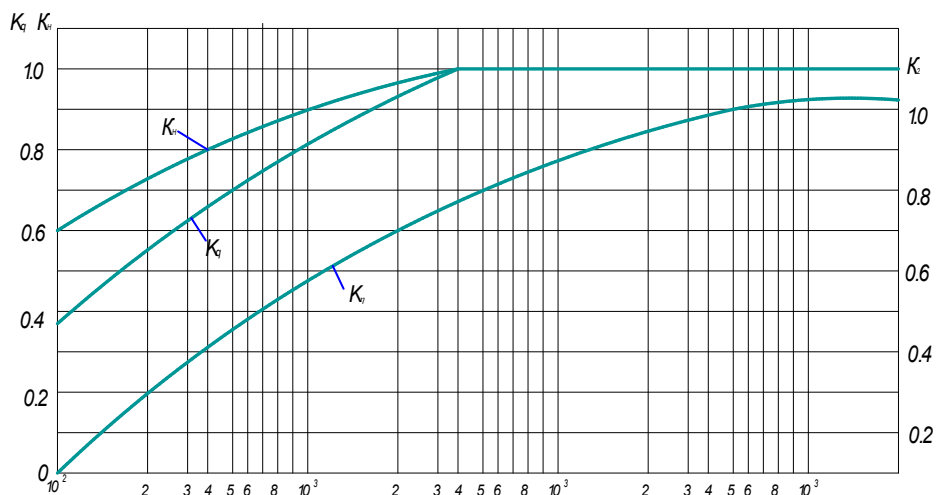


Рис. 6. Зависимость коэффициентов от числа Рейнольдса

С помощью полученных коэффициентов определяются значения подачи, напора и коэффициента полезного действия для вязкой жидкости:

$$Q_{в.ж.} = K_q Q; H_{в.ж.} = K_n H; \eta_{в.ж.} = K_\eta \eta.$$

Полезная мощность в среде с вязкой жидкостьюю:

$$P = \frac{Q_{в.ж.} H_{в.ж.} g \rho_{в.ж.}}{75 \eta_{в.ж.}}$$

По результатам расчета для исследуемого устройства с параметрами, приведенными в табл. 3, 4, определяется момент трогания.

По результатам расчета для исследуемого устройства с приведенными выше параметрами момент трогания составляет 51,4 Нм. По результатам расчета электромагнитной задачи момент трогания (пусковой момент), развиваемый устройством, составляет 106,9 Нм, что обеспечивает работу смесителя в пусковом и установившемся режимах.

### Вывод

Для повышения эффективности передачи тепла в многосекционном нагревателе необходимо поддерживать температуру пристенного слоя потока нефти на минимальном уровне на входе в каждую последующую нагревательную секцию. Это можно сделать путем перемещения внутреннего, «холодного», слоя в потоке жидкости во внешний, пристенный слой, что приводит к снижению температуры жидкости на входе в очередную нагревательную секцию и, как следствие, к увеличению температурного напора. С этой целью на выходе нагревательной секции устанавливают смеситель специальной конструкции, перемещающий холодную центральную часть потока к стенке нагревателя. Показано, что наиболее эффек-

тивным является использование трехфазного индукционного устройства на базе асинхронного электродвигателя, совмещающего функции привода вращения ротора смесителя и нагревателя. Для повышения коэффициента мощности устройства и улучшения регулировочных свойств смесителя статор трехфазного индуктора встроен в трубопровод. Полученные результаты позволяют выполнить анализ зависимости электромагнитных параметров индуктора – индукции магнитопровода, плотности тока в проводниках, объемной мощности тепловыделения, вращающего момента и других характеристик – от геометрических и электрофизических характеристик системы, вязкости жидкости и частоты и напряжения источника питания. На основании всестороннего анализа полученных зависимостей устанавливается закономерность и степень влияния электрических и геометрических параметров на энергетические характеристики системы. Полученные закономерности далее могут быть использованы при решении задачи выбора оптимальных параметров системы, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики в стационарных режимах работы установки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Губин В.Е., Губин В.В. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. М.: Недра, 1982. 296 с.
2. Трубопроводный транспорт нефти: Сб. науч. трудов. Уфа: ВНИИСПТнефть, 1987. 136 с.
3. Тугунов П.И. Нестационарные режимы перекачки нефтей и нефтепродуктов. М.: Недра, 1984. 224 с.
4. Надиров Н.К., Тугунов П.И. Трубопроводный транспорт вязких нефтей. Алма-Ата: Наука, 1985. 146 с.
5. Конесев С.Г., Хлюпин П.А., Садиков М.Р. Анализ эффективности применения нагревательных систем при перекачке вязких нефтей // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. III Всерос. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2011. С. 211–218.
6. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Экологические нагревательные системы для объектов транспорта и хранения нефти // Безопасность жизнедеятельности, 2012. № 7. С. 35–42.
7. Трофименко К.В., Шишкин Н.Д. Разработка конструкции и оценка параметров индукционного подогревателя нефти и нефтепродуктов // Вестник АГТУ. 2012. № 1 (53). С. 78–83.
8. Шишкин Н.Д. Применение индукционного подогрева нефти при ее транспортировке от месторождений на Северном Каспии // Вестник АГТУ. 2011. № 3. С. 52–56.
9. Струтинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. М.: Инфра-Инженерия, 2015. 272 с.
10. Данилушкин А.И., Базаров А.А., Зиннатуллин Д.А. Исследование электромагнитных и тепловых полей в установке технологического нагрева нефти // Вестник СамГТУ. Сер.: Технические науки. 2004. Вып. 24. С. 171–173.
11. Данилушкин В.А. Оптимизация конструкции и режимов работы индукционных подогревателей высоковязких нефтей при транспортировке по трубопроводам // Вестник СамГТУ. Технические науки. 2004. Вып. 20. С. 176–179.
12. Базаров А.А. Система индукционного нагрева движущейся жидкости // Вестник СамГТУ. Технические науки, 2005. Вып. 37. С. 12–17.
13. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Васильев И.В. Моделирование электромагнитных процессов в многослойной трехфазной индукционной цилиндрической системе // Вестник СамГТУ. Технические науки. 2017. № 3(55). С. 50–60.
14. Ciofalo M., Brucato A., Grisafi F., Torraca N. Turbulent flow in closed and free surface unbaffled tanks stirred by radial impellers // Chemical Engineering Science. 1996. Vol. 51. P. 3557–3573.
15. Haque J.N., Mahmud T., Roberts K.J., Rhodes D. Modeling turbulent flows with free surface in unbaffled agitated vessels // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2006. Vol. 45. P. 2881–2891.

16. Газизуллин Н.А. Перемешивание вязкой жидкости со свободной поверхностью в аппарате с турбинной мешалкой Раптона // Вестник СамГТУ. Технические науки. 2014. Вып. 3(42). С. 146–155.
17. Васильцов Э.А., Ушаков В.Г. Аппараты для перемешивания жидких сред. Л.: Машиностроение, 1979. 272 с.
18. Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Максимова М.А., Сурков Д.В. Разработка и исследование трехфазного индукционного устройства для нагрева и перемешивания жидкости // Вестник СамГТУ. Технические науки. 2019. Вып. 3(63). С. 120–132.
19. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М.: Энергоатомиздат, 1984. 424 с.
20. Башуров Б.П. Судовые насосы и вентиляторы. В/О Мортехреклама, 1983. 32 с.
21. Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. Самара: Самарский дом печати, 2003. 336 с.
22. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.9. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2009.
23. Карпушкин С.В., Краснянский М.Н., Борисенко А.Б. Расчеты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов: учеб. пособие. Тамбов: ТГТУ, 2009. 168 с.
24. 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. СПб.: АНО НПО «Мир и Семья», 2001. 1154 с.

*Статья поступила в редакцию 21 октября 2021 г.*

# DEVELOPMENT AND RESEARCH OF INDUCTION HEATING SYSTEM IN TECHNOLOGICAL COMPLEXES OF OIL TRANSPORTATION

*A.I. Danilushkin, V.A. Danilushkin* \*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: aidanilushkin@mail.ru

**Abstract.** *The problem of development and research of an induction system for heating viscous non-conductive liquids during transportation through pipelines is considered. A specific feature of the research object is the combination of the processes of heating a laminar fluid flow in a cylindrical inductor and mixing in a three-phase inductor - mixer. Research of interrelated electromagnetic, thermal and electromechanical processes in heating and stirring systems has been carried out. The results of a numerical calculation of electromagnetic and thermal fields and the electromagnetic moment of rotation of the rotor in a heated liquid are presented. A relationship has been established between the thermal power released in the elements of the system and the power used to rotate the rotor. The electromechanical (control) characteristics of the induction mixer are given. It is shown that with an appropriate choice of design and operating parameters of the induction system, it is possible to find the required ratio between the thermal power released in the elements of the system and the power used to stir the liquid. The results of the research are intended to solve the problems of designing the design of induction systems for heating viscous liquids and effective control of the heating process.*

**Keywords:** *induction heating, mathematical model, heat exchange, temperature distribution, pipeline transport, management, energy efficiency.*

## REFERENCES

1. *Gubin V.E., Gubin V.V.* Pipeline transport of oil and oil products. M.: Nedra, 1982. 296 pp.
2. Pipeline transport of oil: SB. nauch. trudov. Ufa: VNIIS-Ptneft, 1987. 136 pp.
3. *Tugunov P.I.* Non-Stationary modes of oil and oil products pumping. M.: Nedra, 1984. 224 pp.
4. *Nadirov N.To., Chugunov P.I.* Pipeline transportation of viscous NEF-Tay. Alma-ATA: Nauka, 1985. 146 pp.
5. *Konesev S.G., Khlyupin P.A., Sadikov M.R.* Analysis of the effectiveness of heating systems when pumping viscous oils electric Drive, electrical technologies and electrical equipment of enterprises // SB. nauch. Tr. III All ROS. nauch. – tehn. Conf. (from the international school). Ufa: USNTU, 2011. P. 211–218.
6. *Konesev S.G., Khlyupin P.A.* Environmental heating systems for oil transport and storage facilities // Life safety, 2012. № 7. P. 35–42.
7. *Trofimenko K.V., Shishkin N.D.* Design development and evaluation of parameters of an induction heater for oil and petroleum products // AGTU Bulletin, 2012. № 1(53). P. 78–83.
8. *Shishkin N.D.* Application of induction heating of oil during its transportation from fields in the Northern Caspian // Vestnik AGTU. 2011. № 3. P. 52–56.
9. *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 pp.
10. *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. Technical Sciences, 2004. Vol. 24. P. 171–173.

---

\* *Aleksandr I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*  
*Vasiliy A. Danilushkin (PhD (Techn.)), Associate Professor.*

11. *Danilushkin V.A.* Optimization of design and operation modes of induction heaters of high-viscosity oils during transportation through pipelines // *Vestnik SamGTU. Technical Sciences*, 2004. № 20. P. 176–179.
12. *Bazarov A.A.* System of induction heating of a moving liquid // *Vestnik SamGTU. Technical Sciences*. 2005. № 37. P. 12–17.
13. *Bazarov A.A., Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Vasiliev I.V.* Modeling of electromagnetic processes in multilayer three-phase induction cylindrical system // *Vestnik SamGTU. Technical Sciences*. 2017. № 3(55). P. 50–60.
14. *Ciofalo M., Brucato A., Grisafi F., Torraca N.* Turbulent flow in closed and free surface unbaffled tanks stirred by radial impellers // *Chemical Engineering Science*, 1996. Vol. 51. P. 3557–3573.
15. *Haque J.N., Mahmud T., Roberts K.J., Rhodes D.* Modeling turbulent flows with free surface in unbaffled agitated vessels // *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2006. Vol. 45. P. 2881–2891.
16. *Gazizullin N.A.* Mixing of a viscous liquid with a free surface in a device with a Rushton turbine agitator // *Vestnik SamGTU. Technical Sciences*, 2014. № 3(42). P. 146–155.
17. *Vasiltsov E.A., Ushakov V.G.* Apparatuses for mixing liquid media. L.: Mashinostroenie, 1979. 272 pp.
18. *Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Maksimova M.A., Surkov D.V.* Development and research of a three-phase induction device for heating and mixing a liquid // *Vestnik SamGTU. Technical Sciences*, 2019. № 3(63). P. 120–132.
19. *Cherkassky V.M.* Pumps, fans, compressors. M.: Energoatomizdat, 1984. 424 pp.
20. *Bashurov B.P.* Ship pumps and fans. I/O Marterella, 1983. 32 pp.
21. *Belousov A.N., Musatkin N.F., Radko V.M.* Theory and calculation of aircraft shovel machines. Samara: Samara house press, 2003. 336 pp.
22. ELCUT. Modeling of two-dimensional fields by finite element method. User manual. Version 5.9. SPb: TOR production cooperative, 2009.
23. *Karpushkin S.V., Krasnyansky M.N., Borisenko A.B.* Calculations and selection of mechanical mixing devices for vertical capacitive apparatuses: textbook. Tambov: TSTU, 2009. 168 pp.
24. *Yuriev A.S., Pirogov S.Yu., Nizovtsev V.M., Grachev I.G., Presnov A.I., Savishchenko N.P., Sokolova A.N.* Reference book on the calculations of hydraulic and ventilation systems. SPb: ANO NPO “Peace and Family”, 2001. 1154 pp.