

УДК 62.50; 620.97

МНОГОСЕКЦИОННАЯ УСТАНОВКА КОСВЕННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЖИДКОСТИ

А.И. Данилушкин, В.Е. Кривошеев, И.В. Васильев

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

Аннотация. Рассматриваются вопросы проектирования высокопроизводительной индукционной установки для нагрева вязких жидкостей при перекачке по трубопроводам. Отмечены специфические особенности технологического процесса транспортировки вязких жидкостей по трубопроводам. Предложено новое устройство, встроенное в линию нагревателя, позволяющее значительно сократить общую длину нагревателя. Предлагаемое устройство выполнено на основе трехфазного индуктора с вращающимся магнитным полем. Устройство обеспечивает одновременно перемешивание и подогрев потока жидкости в процессе ее прохождения через нагреватель. Представлены результаты численного расчета электромагнитных и тепловых полей в системе «индуктор – металлический цилиндр – полый ротор – жидкость». Применение предлагаемого устройства позволяет сократить длину нагревателя на 40÷50 %. Результаты проведенных исследований предназначены для решения задачи расчета оптимальных конструктивных и режимных параметров многосекционного нагревателя.

Ключевые слова: индукционный нагрев, проектирование, частота, мощность, моделирование, электромагнитные процессы, температурное распределение.

Проблема повышения эффективности и эксплуатационной надежности нагревательных комплексов в технологических процессах, связанных с переработкой и транспортировкой жидких сред, таких как, например, подогрев нефти и нефтепродуктов при их транспортировке и переработке [1–4], является комплексной и предполагает привлечение современных методов исследования на стыке различных направлений. Одним из перспективных путей решения проблемы является применение надежных и экологически чистых установок нагрева жидкостей на базе низкотемпературных индукционных нагревателей [5–7].

При проектировании индукционных нагревателей для транспортировки высоковязких нефтей по магистральной трубопроводной системе параметрами, определяющими конкурентоспособность, являются массогабаритные показатели, срок службы, эксплуатационные характеристики, управляемость, надежность, экологичность и др.

В работах [8–10] рассматривается многосекционный индукционный нагреватель для транспортировки высоковязких жидкостей, в частности высокопарафинистых нефтей. Выполнены исследования электромагнитных и тепловых процессов в системе «индуктор – труба – жидкость». Показано, что вследствие низ-

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

Владимир Евгеньевич Кривошеев (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Промышленная энергетика».

Иван Владимирович Васильев, аспирант.

кой теплопроводности и высокой вязкости нефти при наличии технологических ограничений на максимальную температуру контактирующих поверхностей трубы и жидкости для трубопроводных систем индукционные нагреватели должны иметь несколько автономных секций с развитой поверхностью теплообмена. В этом случае, как показывает практика, общая длина нагревателя составляет не менее 12÷14 м [10]. 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. При практически реализуемых скоростях потока нефти в трубопроводных системах турбулентное течение вязкой жидкости получить не представляется возможным. Решение указанной проблемы путем использования внешнего устройства для перемешивания усложняется наличием высокого давления в трубопроводе, которое предполагает полную герметизацию трубопроводной системы.

Одним из способов сокращения длины нагревательной системы является использование устройства, обеспечивающего перемешивание жидкости в процессе ее прохождения через нагреватель. Наличие таких смесителей позволяет значительно сократить длину нагревателя, что в конечном итоге позволит сократить суммарные затраты на нагреватель. В работе [11] рассматривается такой вариант с применением индукционного смесителя на основе трехфазного индуктора с вращающимся ротором в его расточке. Однако предложенная в работе конструкция смесителя не обеспечивает интенсивного перемешивания жидкости, поскольку слои жидкости не изменяют своего положения по сечению потока до входа в смеситель и после выхода из него. Энергия вращения используется на создание дополнительного напора в трубе, что в данном случае не оказывает существенного влияния на процесс перекачки. Положительным эффектом такого устройства является дополнительный подогрев жидкости за счет тепла, выделяемого в роторе смесителя. В связи с этим возникает необходимость разработки конструкции ротора-смесителя, обеспечивающего интенсивное перемешивание жидкости в потоке, и выработки рекомендаций по расчету мощности индуктора, необходимой для интенсивного перемешивания жидкости в зависимости от параметров процесса.

Функциональная схема одной секции исследуемой индукционной нагревательной системы представлена на рис. 1. Здесь индуктор № 1 – цилиндрический индуктор для нагрева жидкости, индуктор № 2 – трехфазный индуктор с вращающимся магнитным полем.

Основная проблема, возникающая при расчете параметров индукционного смесителя, заключается в решении взаимосвязанных гидравлической, электромагнитной и тепловой задач в сопряженных телах сложной конфигурации. В настоящей работе с учетом некоторых допущений рассматривается методика расчета параметров многосекционного нагревателя с индукционным смесителем, обеспечивающим одновременно интенсивное перемешивание и подогрев вязкой жидкости.

Задачу интенсивного перемешивания жидкости позволяет решить конструкция, объединяющая достоинства роторов осевого и центробежного типов. Такая конструкция ротора – крыльчатки [12, 13], получившая название диагональной, представлена на рис. 2.

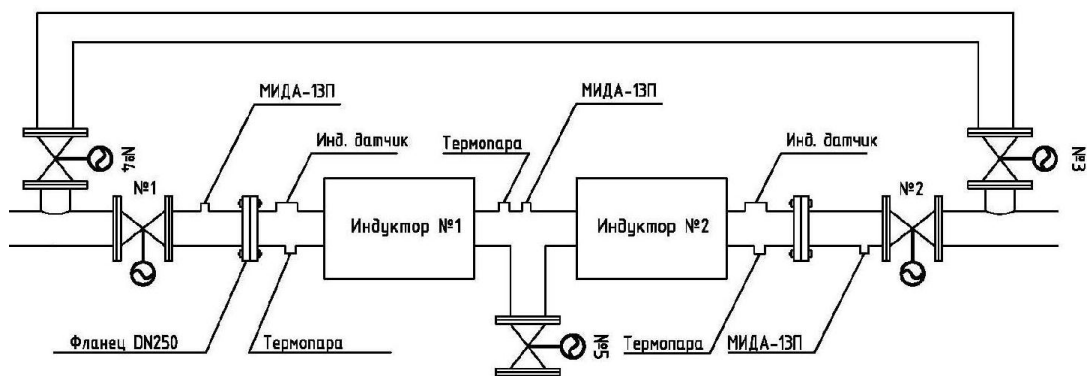


Рис. 1. Функциональная схема участка исследуемой установки

Ядро потока жидкости через центральное входное окно ротора поступает во внутренний объем ротора и по каналам лопаток изменяет осевое направление движения на радиальное. Из щелей в концевых участках лопаток жидкость выбрасывается в пристенные слои потока, перемешиваясь с ними. Двигающаяся над ядром потока часть среды, не изменяя направления движения, омывает лопатки с наружной стороны и подается ими вперед, параллельно оси трубы. Ротор диагонального типа, как и осевой ротор, не создает существенного сопротивления движению среды в трубе, как и центробежный ротор, но активно перемешивает холодное ядро потока с разогретыми пристенными слоями, снижая температуру этих слоев и выравнивая температуру всего потока жидкости.

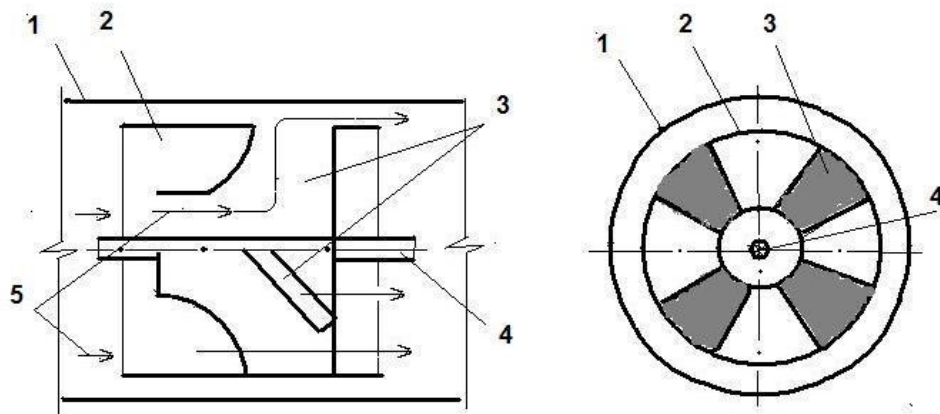


Рис. 2. Схема ротора диагонального типа смесителя:
 1 – труба подачи жидкости; 2 – ротор; 3 – лопатки крыльчатки; 4 – опорный вал;
 5 – линия движения потока жидкости

Небольшое проходное сечение между наружным диаметром ротора и внутренним диаметром подающей трубы, так называемое пространство щелевого диффузора [14, 15], требует разместить выходное окно из лопатки на ее тыльной поверхности, в конце.

Число лопаток ротора и угол их поворота по отношению к оси подающей трубы выбираются таким образом, чтобы отсутствовала возможность свободного пролета жидкости между лопатками без взаимодействия с ними.

Число оборотов, об/сек, вала ротора от воздействия потока жидкости определяется по зависимости [14]

$$\omega = \frac{V_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\pi d},$$

где $\operatorname{tg} \alpha = B/a$;

V_0 – скорость потока, двигающегося по трубе, м/с;

a – ширина пояса лопаток;

B – расстояние между лопатками, шаг лопаток;

α – угол между направлением потока и лопаткой;

d – диаметр вала, на который посажены лопатки.

С учетом вращающего момента, создаваемого трехфазной обмоткой индуктора, фактическое число оборотов вала определяется как сумма

$$\omega_{\text{факт.}} = \omega \pm \omega_1,$$

где ω_1 – число оборотов ротора под действием вращающего момента индуктора. Таким образом, число оборотов можно регулировать в зависимости от интенсивности перемешивания жидкости.

Для расчета конструктивных и режимных параметров нагревательной системы с учетом специфики предлагаемого устройства используется программный комплекс Elcut 5.9 [16]. 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 [17].

При решении электромагнитной задачи принимаются следующие допущения. Поле принимается квазистационарным. Это допущение позволяет пренебречь токами смещения по сравнению с токами в проводниках. Не учитываются потери на гистерезис в силу их незначительности по сравнению с потерями от вихревых токов.

Принятые допущения позволяют упростить решение электромагнитной задачи. Граница раздела магнитных сред описывается системой соотношений

$$B_{1n} = B_{2n}; \quad \mu_1 H_{1n} = \mu_2 H_{2n}; \quad H_{1\tau} - H_{2\tau} = \frac{dI}{dl}. \quad (1)$$

Последнее выражение в (1) учитывает скачкообразное изменение вектора напряженности $\{\overline{H}\}$ на границе раздела сред. При $\frac{dI}{dl} = 0$ тангенциальные составляющие напряженности $\{\overline{H}\}$ на границе раздела непрерывны:

$$H_{1\tau} = H_{2\tau}; \quad \frac{B_{1\tau}}{\mu_1} = \frac{B_{2\tau}}{\mu_2}.$$

Решение краевой задачи расчета магнитного поля в изотропной среде эквивалентно минимизации энергетического функционала \bar{A} :

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

Для учета нелинейной зависимости $\mu_a(H)$ в ферромагнитных областях разработан итерационный алгоритм многократного решения результирующей системы уравнений. Определение магнитной проницаемости производится с помощью введения в программу расчета полинома, аппроксимирующего кривую намагничивания. В результате расчета получены кривые распределения удельной мощности нагрева по радиальной и аксиальной координатам нагревателя.

Следующим этапом исследования является разработка алгоритма расчета тепловых процессов в сложной физически неоднородной системе сопряженных тел с относительным движением. Удельная плотность мощности внутренних источников тепла и характер их распределения определены при решении электромагнитной задачи. Решение тепловой задачи выполняется с использованием первого закона термодинамики. Запишем его с использованием дифференциальных уравнений для объемных тел [18]:

$$\gamma c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = \dot{q} \quad (3)$$

где $\{L\}^T$ – векторный оператор;
 $\{v\}$ – вектор, характеризующий скорость переноса тепла;
 $\{q\}$ – вектор теплового потока;
 \dot{q} – скорость образования тепла в конечном объеме.

Закон Фурье устанавливает связь между вектором теплового потока и температурным градиентом:

$$\{q\} = -[D] \{L\} T, \quad (4)$$

где $[D]$ – матрица теплопроводности.

Объединение уравнений (3), (4) даст уравнение вида

$$\gamma c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) = \{L\}^T ([D] \{L\} T) + \dot{q}; \quad (5)$$

Полученные уравнения используются для решения задач в декартовой системе координат. Задача рассматривается в линейной постановке.

Исходными данными для расчета являются: геометрические параметры индукционного нагревателя, теплофизические характеристики материалов нагревателя, реологические характеристики жидкости, их зависимость от температуры, энергетические и технологические ограничения.

Выполнен сравнительный анализ результатов расчета длины нагревателя и распределения удельной поверхностной мощности по его длине без смесителя и при использовании индуктора-смесителя. Расчеты выполнены с учетом предельно допустимых значений температуры поверхностного слоя жидкости.

Параметры нагревателя: диаметр трубы – 0,34 м, начальная температура жидкости – 20 град, средняя температура жидкости на выходе из нагревателя –

70 град, предельно допустимая температура контактирующих поверхностей – 150 град, длина первого интервала (участка с максимальным уровнем мощности) составляет 1,1 м, длина нагревателя без смесителя – 13,6 м.

Как следует из расчетов, алгоритм распределения удельной поверхностной мощности по длине нагревателя с учетом технологического ограничения на температуру пограничного слоя жидкости имеет два участка: первый участок – при максимальной удельной поверхностной мощности $P_{\max}(x)$, второй – участок движения по температурному ограничению, причем участок движения по ограничению носит существенно нелинейный характер, а его длина является преобладающей, что объясняется ламинарным характером течения и низким коэффициентом теплопроводности нагреваемой жидкости.

Нелинейный характер распределения удельной поверхностной мощности, ограничивающий реальные возможности индукционного нагревателя, обусловлен технологическим ограничением на температуру приграничного слоя нефти. Низкий коэффициент теплопроводности нагреваемой жидкости при ламинарном характере течения и жесткие требования к температуре поверхностного слоя приводят к тому, что индукционные нагреватели имеют большую протяженность и могут рационально использоваться только при небольшой производительности нагревательной линии.

Реализация участка движения по температурному ограничению при неравномерном распределении удельной мощности по длине представляется достаточно сложной задачей, т. к. требует изготовления катушки индуктора с существенно неравномерным шагом намотки. В связи с этим в работе предложен алгоритм распределения удельной мощности индуктора в виде кусочно-постоянной функции.

На рис. 3 представлена аппроксимация распределения удельной поверхностной мощности в виде кусочно-постоянной функции, а на рис. 4 – соответствующее температурное распределение по длине в поверхностном слое жидкости и средняя по сечению потока температура.

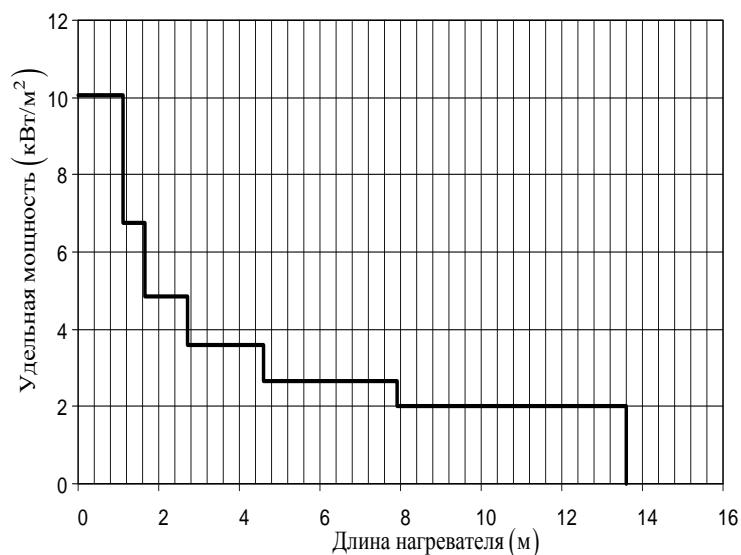


Рис. 3. Аппроксимация распределения удельной поверхностной мощности по длине нагревателя кусочно-постоянной функцией

На рис. 5 представлены температурные распределения в различных сечениях потока жидкости по длине нагревателя. Как следует из результатов расчета, перепад температуры по сечению потока значительный. Причиной этого является низкая теплопроводность нагреваемой жидкости и ламинарный характер течения. Сразу после первой секции нагревателя температура пограничного слоя медленно двигающейся вязкой жидкости у внутренней стенки трубы вырастает и далее остается постоянной. Ламинарное движение всегда характеризуется низким коэффициентом теплоотдачи. Уменьшение разницы температур между стенкой трубы и пограничным слоем совместно с низким коэффициентом теплоотдачи приводит к существенному снижению отвода теплоты от стенки к жидкости. При постоянной мощности индуктора должна была вырастать температура стенки трубы, но технологическое ограничение на величину температуры стенки на уровне 150°C вынуждает снижать мощность индуктора. Величина теплового потока от стенки трубы к жидкости продолжает оставаться небольшой в течение всего процесса нагрева.

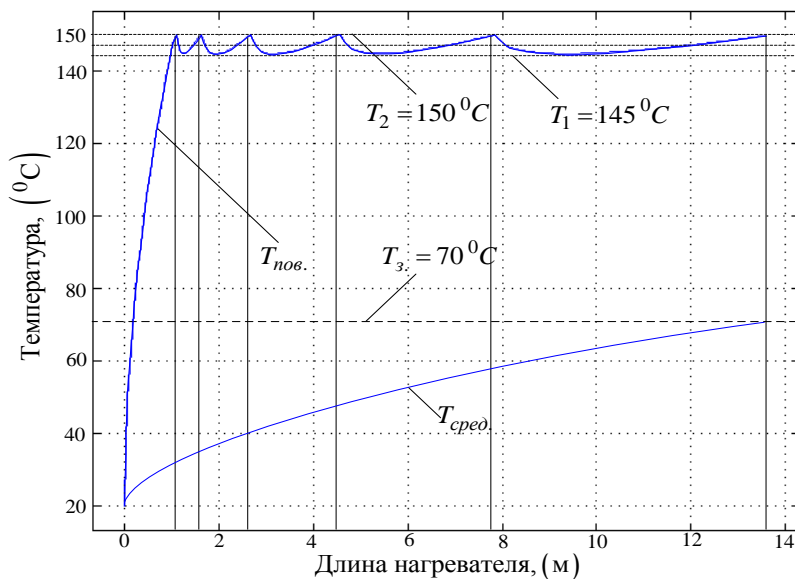


Рис. 4. Распределение температуры жидкости по длине нагревателя:

$T_{нов.}$ — температура поверхностного слоя жидкости;

$T_{сред.}$ — средняя по сечению потока температура жидкости

Применение смесителей позволяет понизить температуру приграничного слоя жидкости до средней по сечению, вследствие этого вырастет температурный напор между стенкой трубы и приграничным слоем жидкости. Это увеличивает поток тепла от стенки трубы в жидкость, при этом температура стенки трубы останется прежней. Большой отвод теплоты от стенки трубы даст возможность повысить мощность индуктора.

Полученные результаты позволяют решить задачу минимизации длины нагревателя, решение которой может существенно повысить технико-экономические показатели процесса. Поиск ведется относительно двух неизвестных: общей длины нагревателя и уровня удельной поверхностной мощности, причем длину секции выбирают из условия согласования параметров индуктора

с сетью. Процедура поиска базируется на численном решении обратной задачи теплопроводности для системы тел при наличии технологического ограничения на температуру поверхностного слоя жидкости [19].

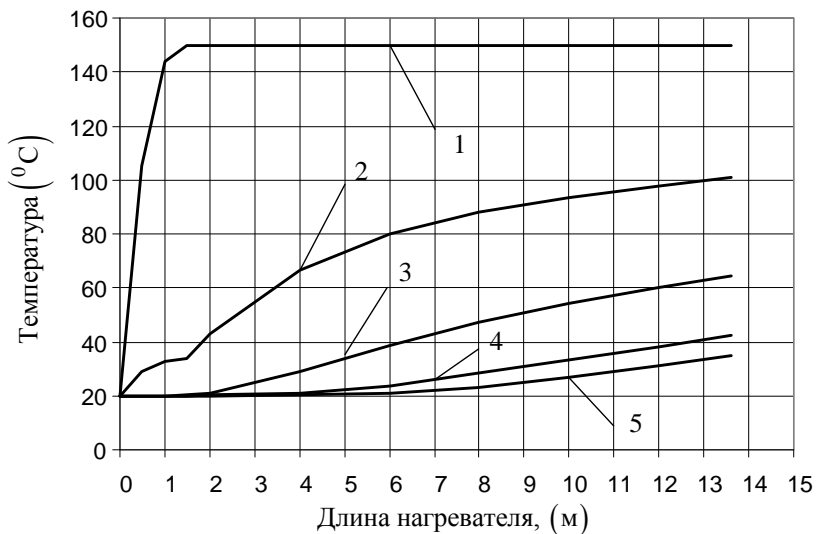


Рис. 5. Распределение температуры жидкости по длине нагревателя:
 1 – температура приграничного слоя жидкости;
 2, 3, 4, 5 – температура жидкости в различных сечениях потока

На рис. 6 приведены результаты расчета температуры нагревателя в различных сечениях потока. Нагреватель состоит из шести секций. Каждая секция включает проточный нагреватель с индуктором соленоидального типа и трехфазный индуктор-смеситель. Длина секции – 1,2 м. Как следует из результатов расчета, длина многосекционного нагревателя с применением индукционного смесителя сократилась с 13,6 до 7,2 м.

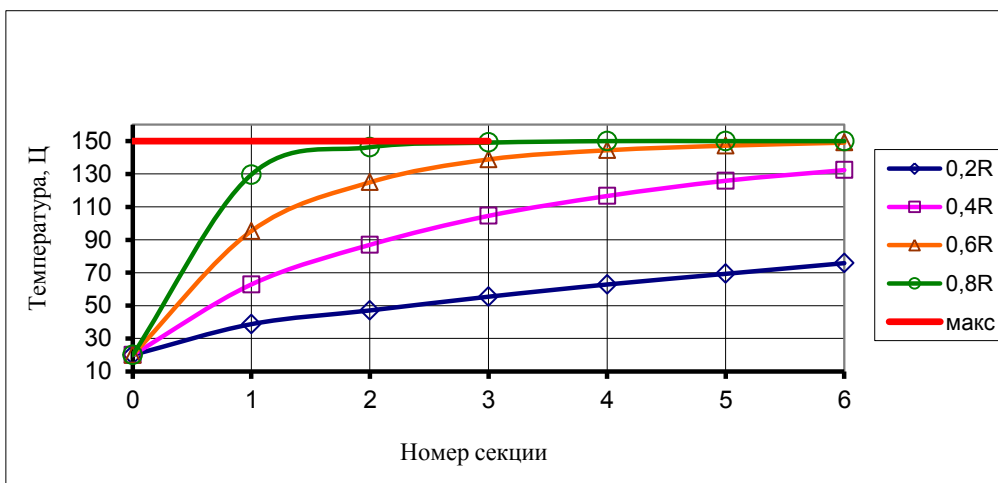


Рис. 6. Температурное распределение по длине нагревателя в различных сечениях потока

Вывод

Высокопроизводительные установки для предварительного подогрева нефти перед транспортировкой по трубопроводной системе имеют несколько автономных секций и значительную длину. Высокая вязкость и низкая теплопроводность нефти в сочетании с технологическим ограничением на максимальную температуру нагреваемой жидкости не позволяют использовать все преимущества индукционной технологии для интенсификации процесса нагрева и сокращения массогабаритных показателей нагревателя. Значительное сокращение длины нагревательной системы можно получить лишь при использовании специальных устройств для перемешивания. При использовании смесителей, установленных между нагревательными секциями, задача проектирования индукционного нагревателя минимальной длины сводится к определению предельного значения мощности каждой секции с учетом максимально допустимого значения температуры пограничного слоя нагреваемой жидкости. Предлагаемое устройство – смеситель, выполненный на основе трехфазной индукционной системы с вращающимся магнитным полем и специального ротора-крыльчатки, – позволяет вдвое сократить длину нагревателя.

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 нефти 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. Фонарев З.И. Электроподогрев трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования в нефтяной промышленности. – Л.: Недра, 1984. – 148 с.
6. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли / Струтинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б. – М.: Инфра-Инженерия, 2015. – 272 с.
7. Индукционные котлы EXPRO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://protek.if.ua/induct-boilers.html>.
8. Данилушкин А.И., Базаров А.А и др. Исследование электромагнитных и тепловых полей в установке технологического нагрева нефти // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2004. – № 24. – С. 171–173.
9. 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.
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 и др. Моделирование электромагнитных процессов в многослойной трехфазной индукционной цилиндрической системе // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – № 3(55). – С. 50–60.
12. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 424 с.
13. Башууров Б.П. Судовые насосы и вентиляторы. – В/О Мортехреклама, 1983. – 32 с.
14. Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф и др. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – Самара: Самарский дом печати, 2003. – 336 с.
15. Альтишль А.Д., Киселёв П.Г. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1965. – 273 с.
16. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.7. – СПб.: Производственный кооператив TOP, 2009.
17. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1988. – 280 с.
18. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

19. *Ранопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.

Статья поступила в редакцию 17 января 2018 г.

MULTISECTIONAL INSTALLATION OF INDIRECT INDUCTION HEATING OF THE LIQUID

A.I. Danilushkin, V.E. Krivosheev, I.V. Vasiliev

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

Abstract. *The paper deals with the design of a high-performance induction plant for heating viscous liquids when pumping through pipelines. Specific features of the technological process of transportation of viscous liquids through pipelines are noted. A new device built into the heater line is proposed, which makes it possible to reduce the overall length of the heater significantly. The device is made on the basis of a three-phase inductor with a rotating magnetic field. The device provides simultaneous mixing and heating of the liquid flow while passing through the heater. The results of numerical computation of electromagnetic and thermal fields in the "inductor-metal cylinder-hollow rotor-liquid" system are presented. It is shown that the use of the proposed device makes it possible to shorten the length of the heater by 40 ÷ 50%. The results of the studies are intended to solve the problems of calculating the optimal design and operation parameters of a multi-section heater.*

Keywords: *induction heating, design, frequency, power, modeling, electromagnetic processes, temperature distribution.*

*Aleksandr I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vladimir E. Krivosheev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Ivan V. Vasilyev, Postgraduate Student.*