

ЭНЕРГЕТИКА

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.365

DOI: 10.17673/Vestnik.2016.04.23

А.А. БАЗАРОВ

А.И. ДАНИЛУШКИН

В.А. ДАНИЛУШКИН

И.В. ВАСИЛЬЕВ

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ НАГРЕВА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGICAL COMPLEX FOR VISCOUS LIQUID HEATING

Рассматриваются вопросы создания индукционной установки для технологического нагрева вязких жидкостей. Исследуются взаимосвязанные электромагнитные, тепловые и гидравлические процессы в системе «индуктор – тепловыделяющий цилиндр – поток жидкости». Отмечены специфические особенности методики расчета, обусловленные физически неоднородной структурой системы нагрева, сложным характером теплообмена между элементами системы и наличием нелинейностей. Представлены результаты численного расчета электромагнитных и тепловых полей в нагреваемой жидкости. На основе проведенных исследований разработана конструкция индукционной системы для нагрева вязких жидкостей.

Ключевые слова: индукционный нагрев, теплообмен, моделирование, температурное поле, управление

The article examines the creation of induction plant for process of viscous liquids heating. Interconnected electromagnetic, thermal and hydraulic processes in the system «inductor – heat out of cylinder – liquid flow» are explored. Specific peculiarities of methods of calculation, caused by physically inhomogeneous structure of the heating system, the complex nature of heat exchange between the system elements and the presence of nonlinearities are marked. The results of numerical calculation of electromagnetic and thermal fields in the fluid to be heated are presented. The design of induction system for viscous fluids heating is developed on the base of conducted studies.

Keywords: induction heating, heat transfer, simulation, thermal field, control

В настоящее время всё большее применение находят установки индукционного нагрева в таких нетрадиционных областях, как строительная индустрия, трубопроводный транспорт нефти, нефтеперерабатывающее производство и др. Индукционные установки, используемые в этих отраслях промышленности, имеют ряд особенностей, выделяющих их в отдельный класс объектов. Специфические свойства нагреваемых жидкостей, такие как низкая теплопроводность, высокая вязкость, существенно зависящие от температуры, а также принципиальные особенности способа индукционного нагрева обусловили необходимость разработки конструкции теплообменного аппарата, значительно отличающейся от существующих конструкций с внешним обогревом паром, отходящими печными газами или жидким теплоносителем [1, 2]. Эффективность применения индукционного нагрева можно повысить

только на основе комплексного подхода, включающего несколько направлений: снижение суммарных тепловых и электрических потерь в процессе нагрева за счет выбора оптимальных конструктивных параметров индуктора; уменьшение энергозатрат на нагрев в нестационарных режимах работы нагревательного комплекса при отработке глубоких возмущений в переходных режимах работы установки за счет внедрения оптимальных алгоритмов и систем управления; снижение электрических потерь за счет внедрения комплексной системы регулирования электрического и теплового режима, включающей систему автоматической компенсации реактивной мощности индуктора и систему оптимальной стабилизации температуры в установившемся режиме работы [3–6]. Жесткие технологические требования, предъявляемые к энергетическому узлу нагревательных установок, дополняются требованиями высокой

эффективности процесса нагрева, снижения себестоимости и повышения производительности.

Математическое описание процессов индукционного нагрева представляет собой систему детерминированных нелинейных дифференциальных и интегральных уравнений, записанных для многомерных и многосвязных областей. Если не вводить существенных упрощений в постановку задачи, то решение указанной системы уравнений, а следовательно, и количественное описание изучаемого объекта практически может быть получено только численными методами. Значительное место в настоящее время занимает при исследованиях процесса индукционного нагрева моделирование с использованием компьютерных технологий [7–9].

Конструкция нагревателя представляет собой два осесимметричных стальных цилиндра, в кольцевом зазоре между которыми протекает нагреваемая жидкость. Внешняя труба охватывается катушкой индуктора, который создает переменное электромагнитное поле.

Процесс индукционного нагрева рассматриваемого класса объектов, представляющего собой систему сопряженных разнородных по физическим свойствам осесимметричных цилиндров, описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями [10, 11].

$$\begin{aligned} \operatorname{rot}\{\bar{H}\} &= \{J_s\} + \{J_e\}; \\ \operatorname{rot}\{\bar{E}\} &= -\left\{\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}\right\}; \operatorname{div}\{\bar{B}\} = 0; \\ c_1(T_1)\gamma_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} &= \operatorname{div}(\lambda_1(T_1)\operatorname{grad}T_1) - \operatorname{div}[EH]; \\ c_2(T_2)\gamma_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial t} &= \operatorname{div}(\lambda_2(T_2)\operatorname{grad}T_2) - \\ &- c_2(T_2)\gamma_2(T_2)V(r)\operatorname{grad}T_2 \\ c_3(T_3)\gamma_3(T_3)\frac{\partial T_3}{\partial t} &= \operatorname{div}(\lambda_3(T_3)\operatorname{grad}T_3) - \operatorname{div}[EH]. \end{aligned}$$

Здесь $\{\bar{H}\}, \{\bar{B}\}$ – векторы напряженности магнитного поля и магнитной индукции; $\{J_s\}$ – вектор плотности приложенного тока; $\{J_e\}$ – вектор плотности индуцированного тока; t – время; $T_1(r, x, t)$, $T_2(r, x, t)$, $T_3(r, x, t)$ – соответственно температурные поля внешней трубы, потока жидкости и внутренней трубы; $c_1, c_3, \gamma_1, \gamma_3$ – удельные значения теплоемкости и плотности материалов труб тепло-

обменного аппарата; c_2, γ_2 – удельные значения теплоемкости и плотности нагреваемой жидкости; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коэффициенты теплопроводности материалов внешней трубы, жидкости и внутренней трубы; V – вектор скорости перемещения потока жидкости. Объемная плотность внутренних источников тепла, индуцируемых в трубах теплообменного аппарата, определяется дивергенцией вектора Пойнтинга $\Pi = -\operatorname{div}[EH]$ [10].

При решении электромагнитной задачи принимается ряд допущений. Поле принимается квазистационарным. Это допущение позволяет пренебречь токами смещения по сравнению с токами в проводниках. Не учитываются потери на гистерезис при нагреве ферромагнитных тел в силу их незначительности по сравнению с потерями от вихревых токов [8, 9].

Принятые допущения позволяют упростить решение электромагнитной задачи. Граница раздела магнитных сред описывается системой соотношений [9, 10]:

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

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

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

Кроме условий сопряжения для получения однозначного решения уравнений Максвелла в форме напряженности электрического поля $\{\bar{E}\}$ и напряженности магнитного поля $\{\bar{H}\}$ в области $V \subset R^3$ 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 $V \subset R^3$ с границей S ;
- касательные составляющие вектора $\bar{E}$ или $\bar{H}$ в произвольной точке поверхности в произволь-

ном временном интервале от t_0 до t , или распределения полей $\vec{E}$ и $\vec{H}$ вне исследуемого объема V ;

– функциональные зависимости параметров ε , μ , γ от координат пространства или от напряженности соответствующего поля.

Решение краевой задачи расчета магнитного поля в изотропной среде эквивалентно минимизации энергетического функционала [12]:

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

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. На рис.1 приведены расчетные кривые распределения удельных мощностей нагрева по радиусу во внешней и внутренней трубах. В примере внешняя труба изготовлена из немагнитной, а внутренняя – из ферромагнитной стали. Расчеты выполнены для индукционного нагревателя производительностью 90 т/сут: длина нагревателя – 3,4 м, мощность – 86 кВт, диаметр внешней трубы – 0,3 м.

Для определения зависимости температурного распределения по сечению потока жидкости при ламинарном характере течения производится расчет гидродинамических характеристик. Матема-

тическое описание движения жидкости основывается на уравнениях неразрывности Навье-Стокса, в которые подставляется истинная скорость, зависящая от радиальной координаты. Уравнение непрерывности для случая вязкой несжимаемой жидкости вытекает из закона сохранения массы [13, 14]:

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

где γ – плотность; v – вектор скорости; t – время. Скорость изменения плотности заменяется на скорость изменения давления P и на скорость изменения плотности по давлению:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{\partial \gamma}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t}.$$

Из закона сохранения масс для ньютоновской жидкости вытекает следующая зависимость между тензором напряжений и скоростью деформации среды:

$$\tau = -P\delta + \frac{\partial v}{\partial \mu_e},$$

где τ – тензор напряжений; μ_e – динамическая вязкость.

Полученное выражение преобразует уравнения движения в уравнения Навье - Стокса:

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

где μ_e – эффективная вязкость, для ламинарной жидкости совпадает с динамической вязкостью, для турбулентного случая задается формулами в зависимости от модели турбулентности.

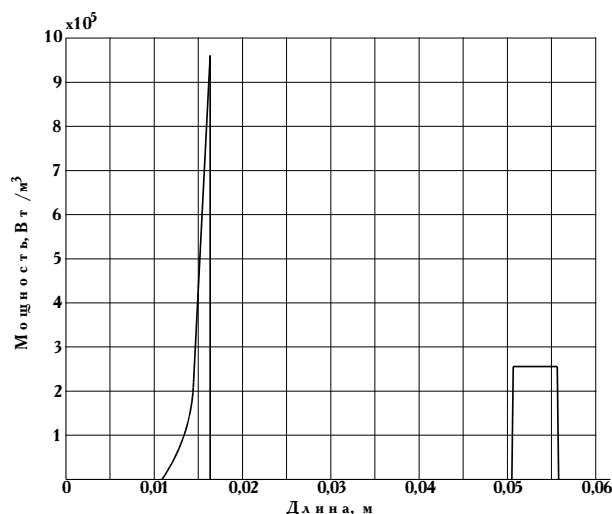


Рис. 1. Распределение удельной мощности по радиусу

Для описания вязкостно-температурной зависимости используется эмпирическая формула [13]:

$$\nu = \frac{420}{1 + 0,005 \cdot T + 0,0055 \cdot T^2 + 0,009 \cdot T^3} + 0,03.$$

На основании приведенных зависимостей методом конечных элементов решена гидравлическая задача, которая позволила определить распределение скоростей по сечению потока жидкости. Расчеты показывают, что для заданной производительности и размеров нагревательной системы имеет место ламинарное течение жидкости.

Следующим этапом исследования является разработка математической модели тепловых процессов с учетом существующих гидравлических процессов.

Схема теплообмена, принятая при решении задачи теплопроводности в исследуемой системе тел, представлена на рис. 2.

Характер распределения и удельная плотность мощности внутренних источников тепла определены в результате решения электромагнитной задачи.

Решение тепловой задачи основывается на первом законе термодинамики, который с использованием дифференциальных уравнений для объёмных тел записывается в виде [11]:

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

где $\{L\}^T$ – векторный оператор; $\{v\}$ – вектор, характеризующий скорость переноса тепла; $\{q\}$ – вектор теплового потока; $\ddot{q}$ – скорость образования тепла в конечном объёме. Закон Фурье устанавливает связь между вектором теплового потока и температурным градиентом:

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

где $[D]$ – матрица теплопроводности.

Для полной физической определенности общая система уравнений дополняется эмпирическими зависимостями вязкости, плотности, удельной теплоемкости нефти, коэффициентов теплопроводности, теплопередачи и других величин от температуры [13–15]. Для решения задачи тепломассопереноса в указанной постановке разработаны вычислительный алгоритм и программа, которая содержит три расчетных блока – электрический, гидродинамический и тепловой.

Исходными данными для расчета являются:

- конструктивные параметры нагревателя – длина нагревателя, геометрические размеры труб, материал труб, электро- и теплофизические характеристики материала труб, табличные значения зависимостей относительной магнитной проницаемости материала труб от напряженности магнитного поля, диаметр индуктирующей катушки, толщина тепловой изоляции;
- энергетические параметры – напряжение питания, частота тока;
- параметры нагреваемой жидкости – теплофизические характеристики нефти, скорость потока жидкости, массив табличных значений зависимостей вязкости нефти, теплоемкости, коэффициента теплопроводности и коэффициента теплообмена от температуры, плотность;
- условия нагрева – начальная температура, заданная конечная температура, ограничения.

Распределение скоростей потока жидкости при ламинарном течении в регулярном режиме показано на рис. 3.

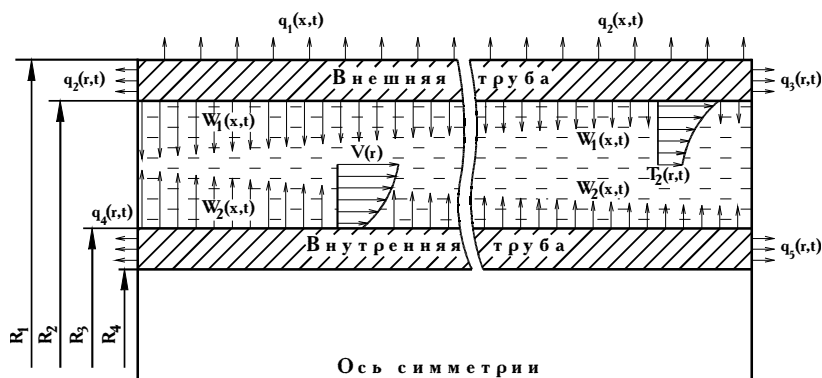


Рис. 2. Схема тепломассопереноса

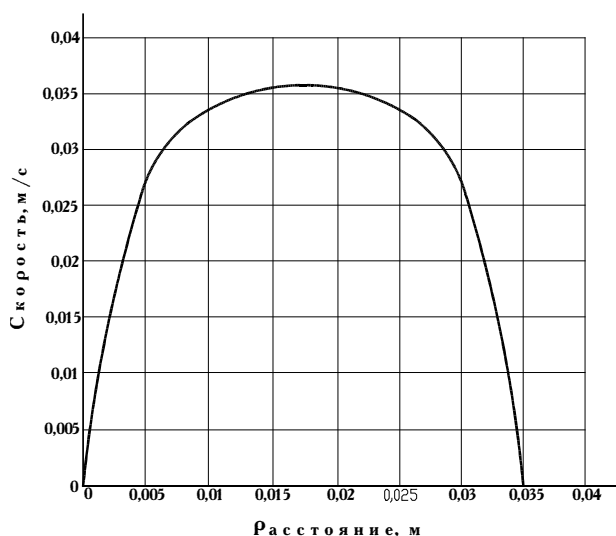


Рис. 3. Распределение скоростей потока жидкости при ламинарном течении

Алгоритм решения тепловой задачи методом конечных элементов реализован программно [16]. Для представления результатов расчета в наглядной форме использовался специальный графический пакет, который позволяет показать распределения температурных полей в виде плоской картины изотерм для всего массива точек сечения нагреваемого тела.

На рис. 4 приведены результаты расчета температурных полей при симметричном (двухстороннем) нагреве. Здесь кривые 1–6 – соответствующие температурные распределения в сечениях потока жидкости на расстоянии 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 м от входа и на выходе из нагревателя. Как показывают расчеты, вследствие низкой теплопроводности нефти при ламинарном течении ее нагрев характеризуется большим перепадом температур по сечению пото-

ка, что приводит к необходимости поиска оптимального соотношения между длиной нагревателя и величиной межтрубного рабочего зазора. При известных производительности магистральной линии трубопровода, температуре нагрева и характеристиках перекачиваемой жидкости полная мощность P , подводимая к индуктору, может быть определена по известному соотношению

$$P = c \cdot \gamma \cdot \Pi \cdot \Delta T + \Delta P_m,$$

где $\Pi = v \cdot S$ – производительность нагревателя; ΔT – приращение температуры на выходе из нагревателя; ΔP_m – тепловые потери с поверхности индуктора.

Значительный перепад температуры между поверхностными слоями и центром потока при ламинарном течении вязкой жидкости вследствие низкой теплопроводности не всегда удовлетворяет техноло-

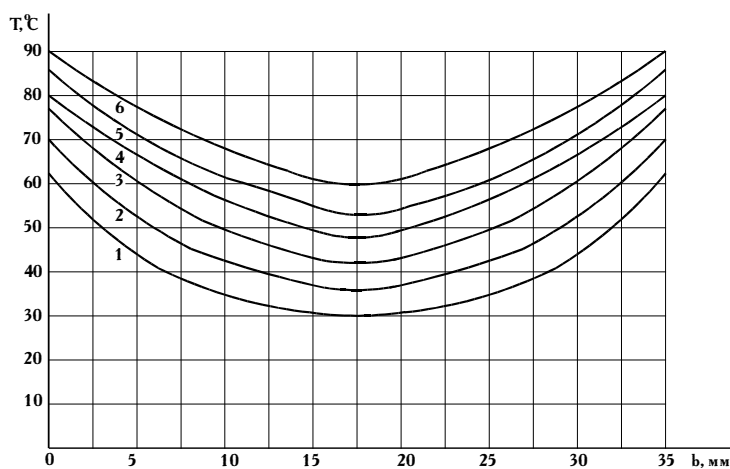


Рис. 4. Распределение температуры по сечению потока

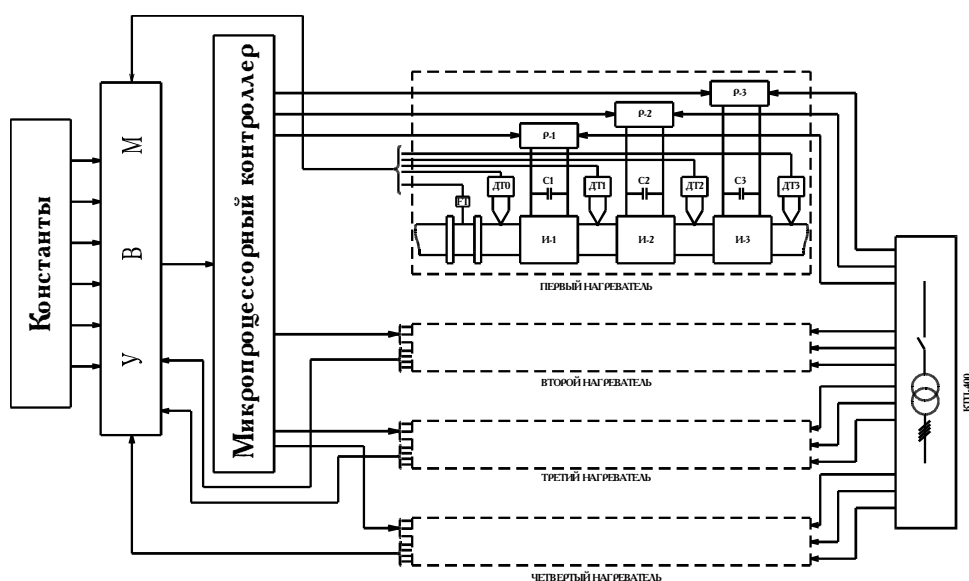


Рис. 5. Функциональная схема технологической установки

гическим требованиям и приводит к необходимости поиска конструкции нагревательной установки, обеспечивающей заданный перепад температур по сечению при ограничении на температуру наиболее нагретого поверхностного слоя. Задача выбора оптимальных параметров конструкции нагревателя может быть решена либо применением теплообменного аппарата с развитой поверхностью теплообмена, либо за счет организации турбулентного течения жидкости. Выбор оптимального варианта представляет собой сложную многопараметрическую задачу, требующую самостоятельного исследования на основе полученных в работе результатов.

На основании анализа технологического процесса нагрева неэлектропроводных вязких жидкостей с помощью численной математической модели нестационарной теплопроводности в системе осесимметричных тел с различными теплофизическими свойствами может быть сформулирована и решена задача оптимизации конструкции нагревателя, обеспечивающая оптимальные по критериям точности нагрева и минимума длины нагревательной системы алгоритмы распределения удельной мощности источников внутреннего тепловыделения вдоль осевой координаты.

На рис. 5 представлена функциональная схема технологической установки для нагрева нефти в магистральном трубопроводе. Установка выполнена в виде набора модулей, число которых зависит от производительности технологической линии.

Система управления реализована на базе программируемого логического контроллера. Каждый вычислительный блок реализуется в виде отдельного блока-функции программы контроллера. Это позво-

ляет модифицировать алгоритм любого блока, не изменяя остальные блоки. Объем программной памяти контроллера и его быстродействие позволяют реализовать на контроллере не только систему автоматического управления нагревом, но и остальные системы, участвующие в технологическом процессе.

Супервизорное управление процессом нагрева осуществляется с автоматизированного рабочего места оператора, реализованного на персональной ЭВМ. Система обеспечивает удобный, интуитивно понятный пользовательский интерфейс, позволяющий в темпе процесса отслеживать изменения всех измеряемых параметров, изменять уставки регуляторов и настройки алгоритмов. Связь управляющего контроллера с операторской станцией осуществляется по промышленной сети PROFIBUS.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базаров А.А., Данилушкин А.И. Исследование взаимосвязанных электромагнитных и термогидравлических процессов при косвенном индукционном нагреве жидких сред // Электротехника. 2009. №7. С. 43–46.
2. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитных сталей. М.: Энергоатомиздат, 1988. 200 с.
3. Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева // материалы Международной конф. СПб.: СПб гос. техн. ун-т «ЛЭТИ», 2005. 391 с.
4. Rudnev V. Handbook of Induction Heating. Marcel Dekker Inc., New York, 2003, p. 277.
5. Yu. E. Pleshivtseva and E.Ya. Rapoport. The Successive Parametrization Method of Control Actions in Boundary Value Optimal Control Problems for Distributed Parameter Systems // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2009, Vol. 48, No 3, PP. 351-362. Импорт фактор журнала в Web of Science 0,191.
6. Rapoport E.Y. Analytical Construction of Aggregated Controllers in Systems with Distributed Parameters

// Journal of Computer and Systems Sciences International, 2012, Vol.51, No3, pp.375-390. Импакт фактор журнала в Web of Science 0,191.

7. Кувалдин А.Б. и др. Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных средах // Электричество. 2005. №11. С. 56–61.

8. Кувалдин А.Б. и др. Электротепловая модель индукционно-резистивной системы нагрева // Электромеханика. 2005. №1. С. 48–53.

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

10. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. М.: Энергия, 1967. 415 с.

11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967. 599 с.

12. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.7. СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2009. 160 с.

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

14. Губин В.Е., Губин В.В. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. М.: Недра, 1982. 296 с.

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

Об авторах:

БАЗАРОВ Александр Александрович

доктор технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: aleksbazarov@yandex.ru

ДАНИЛУШКИН Александр Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: aidanilushkin@mail.ru

ДАНИЛУШКИН Василий Александрович

канд. технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: vasilydan2013@yandex.ru

ВАСИЛЬЕВ Иван Владимирович

аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: nemo260692@gmail.com

BAZAROV Aleksandr A.

Doctor of Engineering Science, Associate Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail:aleksbazarov@yandex.ru

DANILUSHKIN Aleksandr I.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail:aidanilushkin@mail.ru

DANILUSHKIN Vasilij A.

PhD of Technical Science, Associate Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: vasilydan2013@yandex.ru

VASIL'EV Ivan V.

Post-Graduate Student of the Power Supply of Industrial Enterprises Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail:nemo260692@gmail.com

Для цитирования: Базаров А.А., Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Васильев И.В. Энергоэффективный технологический комплекс для нагрева вязкой жидкости // Градостроительство и архитектура. 2016. №4(25). С. 127-134. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.04.23.

For citation: Bazarov A.A., Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Vasil'ev I.V. Energy-efficient technological complex for viscous liquid heating // Urban Construction and Architecture. 2016. №4(25). Pp. 127-134. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.04.23.