



УДК 620.97; 621.365

DOI: 10.17673/Vestnik.2020.02.21

А. И. ДАНИЛУШКИН
В. А. ДАНИЛУШКИН
В. Е. КРИВОШЕЕВ
М. А. МАКСИМОВА

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ МОДУЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ НАГРЕВА ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ОБЪЕКТАХ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

ELECTROTECHNICAL MODULAR COMPLEX FOR HEATING VISCOUS LIQUIDS IN PIPELINE TRANSPORT FACILITIES

Рассматривается проблема повышения эффективности установок для нагрева вязких жидкостей в процессе их транспортировки по трубопроводным системам. Поставленная задача решается за счет интенсификации процесса теплообмена между источниками тепла и нагреваемой жидкостью. Интенсифицировать процесс теплообмена в системах подогрева можно путем применения модульной системы нагрева. Каждый модуль состоит из индукционной нагревательной секции и индукционного смесителя. Смеситель устанавливается на выходе из нагревательной секции. Процесс перемешивания жидкости осуществляется индукционным смесителем специальной конструкции. Предложена методика расчёта температуры потока нефти в трубопроводе за индукционным нагревателем и после смесителя. Методика разработана на основе составления баланса тепловых потоков. Приведен расчет температурного распределения для многосекционного нагревателя, состоящего из нескольких индукционных модулей. Показано, что использование модульной системы позволяет существенно сократить массогабаритные показатели индукционного нагревателя и снизить энергозатраты на транспортировку жидкости.

Ключевые слова: трубопроводный транспорт, электроэнергия, нагреватель, температура, теплообмен, регулирование мощности, энергоэффективность

The article discusses the problem of increasing the efficiency of installations for heating viscous liquids during their transportation through pipeline systems. The posed problem is solved by intensifying the heat transfer process between heat sources and a heated liquid. Intensify the heat transfer process in heating systems by using a modular heating system. Each module consists of an induction heating section and an induction mixer. The mixer is installed at the outlet of the heating section. The process of mixing the liquid is carried out by an induction mixer of a special design. A method for calculating the temperature of the oil flow in the pipeline behind the induction heater and after the mixer is proposed. The methodology was developed on the basis of a balance of heat flows. The temperature distribution for a multi-section heater consisting of several induction modules is calculated. It is shown that the use of a modular system can significantly reduce the overall dimensions of the induction heater and reduce energy costs for transporting liquid.

Keywords: pipeline transport, electricity, heater, temperature, heat transfer, power regulation, energy efficiency

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

Транспорт нефти и нефтепродуктов с использованием трубопроводной системы экономичнее, безопаснее и экологичнее перевозок другими видами транспорта, в частности в цистернах по железным дорогам. Выигрыш в себестоимости достигает 4-кратной величины, включая меньшие потери самой нефти.

Эффективность трубопроводной системы для транспортировки нефти и нефтепродуктов определяется рядом факторов, в числе которых находится вязкость перекачиваемой жидкости, которая оказывает существенное влияние на производительность трубопроводной системы и энергозатраты на перекачку [1–5]. Периодическим подогревом перекачиваемой среды можно понизить величину вязкости, снизив таким способом энергозатраты на перекачку и увеличив среднюю скорость движения нефти. Подогрев осуществляется различными способами. Наиболее надежным и экологически чистым способом подогрева высоковязких и высокостаивающих нефтей в настоящее время является электроподогрев.

В работах [6, 7] приводятся методики расчета, технические характеристики систем электрообогрева, даны рекомендации по их практическому применению. Однако приведенные методики и характеристики относятся к ограниченному классу нагревательных устройств, в которых в качестве источников тепла используются специальные греющие кабели, ленты и индуктивно-резистивные системы.

В работах [8–12] приводятся результаты исследования устройств косвенного индукционного нагрева вязких жидкостей. Показано, что низкая теплопроводность, высокая вязкость нефти и ограничения на максимальную температуру нагрева обуславливают необходимость применения многосекционных индукционных нагревателей, длина которых составляет 12–14 м при требуемой температуре на выходе 50–60 °С.

В связи с вышесказанным актуальной является задача повышения эффективности индукционных нагревательных устройств 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 [13–16]. 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 не-

равномерно. 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 целесообразным в создавшейся ситуации является разработка и применение модульной системы нагрева, состоящей из нескольких соединенных последовательно модулей.

Модуль состоит из индукционного нагревателя соленоидального типа, расположенного на трубопроводе, установленного после нагревателя трехфазного индуктора-двигателя и смесителя, осуществляющих перемешивание и нагрев жидкости после выхода её из нагревательной секции (рис. 1).

В результате перемешивания температура жидкости по сечению потока усредняется и на входе следующего модуля температура пристенного слоя жидкости оказывается значительно ниже, чем температура стенки трубы. Таким образом обеспечивается более интенсивная теплоотдача в жидкость. При этом вся энергия, подведенная к индуктору смесителя, в конечном итоге также преобразуется в тепло, обеспечивая дополнительный нагрев жидкости.

Рассмотрим этот процесс на примере нефти, имеющей существенно нелинейную зависимость вязкости от температуры [3, 4].

В поперечном сечении трубы скорость $v(r)$ потока неравномерная и её величина, кроме вязкости, определена ламинарным режимом течения [3,5].

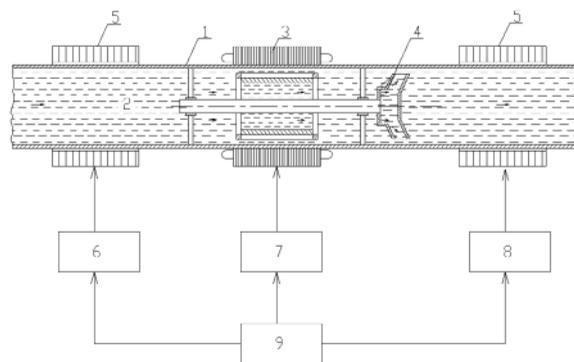


Рис. 1. Схема индукционного модуля с последовательным соединением секций:

1–труба; 2 – нагреваемая жидкость; 3 – трехфазный индуктор; 4 – смеситель; 5 – индуктор нагревательной секции; 6, 7, 8 – источники питания; 9 – система управления

$$v(r) = \frac{1}{\mu} R_0^2 [1 - (r/R_0)^2] \frac{\Delta P}{l}$$

Здесь $v(r)$ – распределение скорости по радиальной координате, м/с; l – длина исследуемого участка; μ – динамическая вязкость, Па·с; R_0 – внутренний радиус трубы; r – текущий радиус по сечению потока жидкости, м; $\frac{\Delta P}{l}$ – линейные потери давления в нефтяной трубе, Па/м. Средняя скорость $v_{cp} = 0,5v_{max}$. Максимальная скорость v_{max} формируется на оси трубы. На рис. 2 представлены эпюры скорости ламинарно текущей нефти в зависимости от температуры. Поток равномерно разогрет и, следовательно, имеет одинаковую вязкость.

Прогрев перекачиваемой нефти от стенки трубы усложняется теплофизическими особенностями потока. Пристенные слои движутся с низкими скоростями.

В противоположность турбулентному движению конвективный теплообмен в радиальном направлении при ламинарном течении отсутствует. Отвод теплоты от стенок трубы к её оси происходит в результате кондукции. Коэффициент кондукции нефти (теплопроводность λ), мазута, других вязких нефтепродуктов низкий [18–20].

Передача тепла от стенки трубы в радиальном направлении потока нефти из-за низкого коэффициента теплопроводности незначительна, вследствие чего пристенный слой

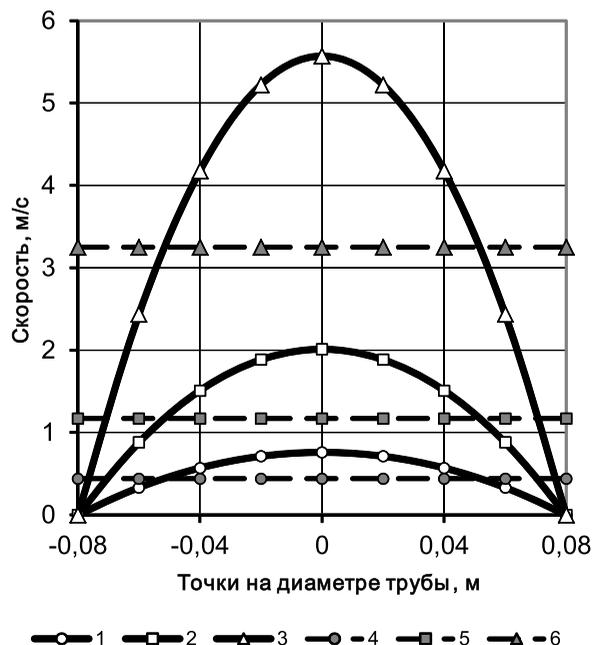


Рис. 2. Радиальная и средняя скорости потока эпюры скоростей: 1 – $t = 20^\circ\text{C}$; 2 – $t = 30^\circ\text{C}$; 3 – $t = 40^\circ\text{C}$; средние скорости: 4 – $t = 20^\circ\text{C}$; 5 – $t = 30^\circ\text{C}$; 6 – $t = 40^\circ\text{C}$

жидкости перегревается. В нём начинается образование паров нефти, её легкокипящих составляющих. Однородность, сплошность потока нарушается. По этой причине на температуру стенки трубы накладывается ограничение. Она не должна быть выше 100°C . Это ограничение существенно влияет на интенсивность теплопередачи, приводит к необходимости увеличивать площадь теплообмена за счет длины нагревательной системы.

Нестационарный процесс нагрева неподвижного плоского слоя нефти в трубе через её стенки описывается уравнением теплопроводности вида [21, 22]:

$$\frac{\partial T(X, Fo)}{\partial Fo} = a \frac{\partial^2 T(X, Fo)}{\partial X^2}$$

Здесь $X = x/2R$ – безразмерная радиальная координата; $T(X, Fo) = \frac{t_{cm} - t}{t_{cm} - t_0}$ – безразмерная температура нефти; t, t_{cr}, t_0 – соответственно температура нефти по координате X , слоя, касающегося стенки трубы, и начальная; $F_0 = a\tau/2R$ – критерий Фурье; a, τ – коэффициент температуропроводности нефти и время прогрева слоя соответственно.

Краевые условия: $F_0 = 0$; $T = 1$; $X = 0$; $X = 1$; $T = 0$.

Задача решалась методом разделения переменных Фурье [23].

Полученное аналитическое решение представляет бесконечную сумму знакопеременного убывающего ряда вида

$$T(X, Fo) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1 - \cos k\pi}{k\pi} \sin(k\pi X) \cdot \exp[-(k\pi)^2 Fo] \right]$$

Результат решения представлен графиками на рис. 3.

В конце первой секунды нагрева нефти с начальной температурой $t = 20^\circ\text{C}$ при постоянной температуре $t_{ст} = 100^\circ\text{C}$ стенки трубы прилегающий неподвижный слой прогревается на глубину 0,005 м. Диаметр трубы 0,16 м. Центральная часть потока, ядро, останется холодной с высоким значением вязкости.

Полученные температурные распределения используются для построения поля скоростей в трубопроводе непосредственно за нагревателем (рис. 4). Здесь графики 1, 2 – соответственно поле скоростей и средняя скорость при нагреве нефти от стенок трубы, 3, 4 – соответственно поле скоростей и средняя скорость нефти, равномерно разогретой до 20°C .

Как следует из графика 1, разогретая от стенок трубы нефть имеет такую же скорость в центральной части потока, что и холодная нефть.

Поля скоростей 1-го и 3-го потоков совпадают почти по всему сечению трубы. Только у стенки трубы проявляется значительное увеличение скорости вследствие разогрева нефти от стенок трубы (график 1). Максимальная скорость у стенки трубы составляет 2,1 м/с. Такое существенное различие возникает благодаря сильному снижению вязкости возле стенки трубы. Как следует из анализа графиков и проведенных расчетов, подогрев нефти за счет тепла, выделяемого в стенке трубы индуцированными электромагнитным полем вихревыми токами, обеспечивает среднюю скорость 2-го потока, превышающую среднюю скорость 4-го потока нефти, равномерно разогретой до температуры 20 °С. В то же время количество тепла, затраченного на нагрев нефти от стенок трубы, значительно меньше, чем для нагрева потока по всему сечению. Это обстоятельство подтверждает целесообразность применения подогрева пограничного слоя нефти. Так, при одном и том же расходе нефти поверхностный подогрев с помощью индукционных нагревателей по сравнению с равномерно нагретой по всему сечению нефтью количество энергии на подогрев в 3,5 раза меньше.

Схема индукционного смесителя представлена на рис. 5.

На трубе 1 расположен трехфазный индуктор 2, выполненный по принципу асинхронного электродвигателя с полым ротором. Установленный на валу ротора лопастной смеситель 6 разделяет поток на три части. Холодное ядро потока 5 входит в окно смесителя и по лопаткам, расположенным под углом к оси трубы, попадает в разогретый пристенный слой 3. Происходит смешение потоков 7, температура пристенного слоя снижается. Центральная часть потока 4 омывает снаружи наклонные лопатки ротора. За лопатками, в кормовой зоне за ротором, центральная часть 8 потока перемешивается с только что образовавшейся смесью в пристенной области.

Нефть с усреднённой за счёт смешения трёх потоков температурой движется к следующему подогревателю. Получаемая температура в потоке жидкости за ротором зависит от соотношения расходов и температур по выделенным трём потокам перед ротором. Размер пристенного слоя – кольца 3 – определяется глубиной кондуктивного прогрева нефти и составляет для рассматриваемой конструкции 0,01 м.

Размер слоя в ядре потока 5 зависит от радиуса входного окна ротора. Как показали исследования, оптимальный радиус входного окна ротора должен составлять не менее 0,25 радиуса трубы, т. е. 0,02 м.

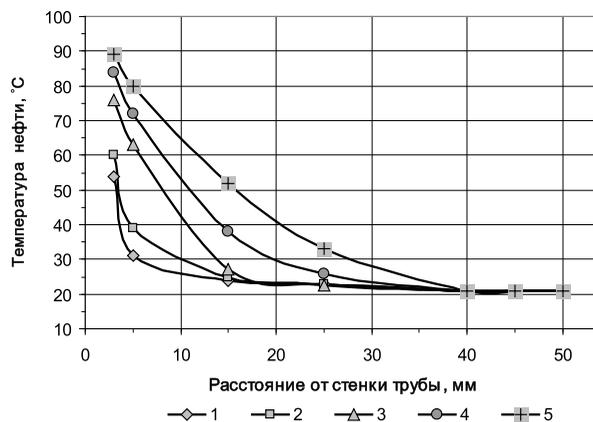


Рис. 3. Распределение температур в пристенном слое нефти: 1 – 1 с; 2 – 1 мин; 3 – 0,125 ч; 4 – 0,25 ч; 5 – 0,5 ч

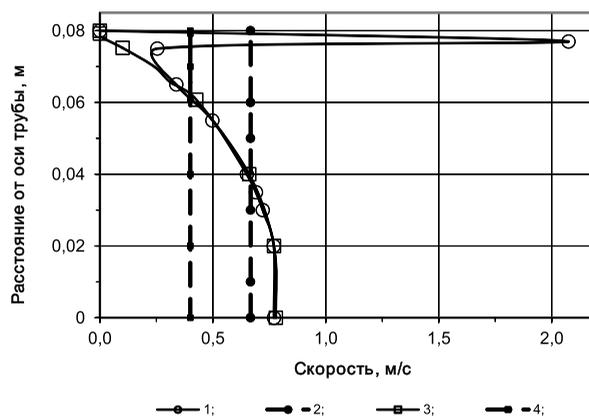


Рис. 4. Распределение скорости нефти в трубе за нагревателем: 1 – нагрев от стенки трубы; 3 – $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; средние скорости: 2 – нагрев от стенки трубы; 4 – $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

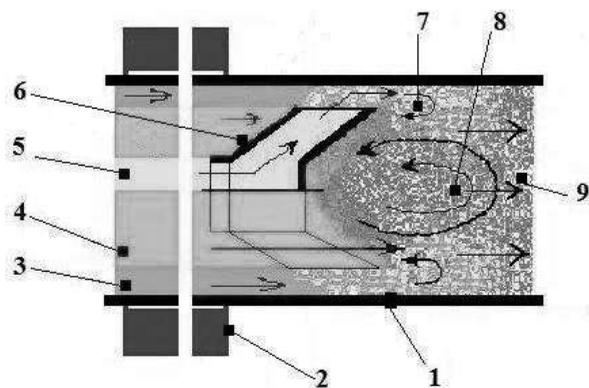


Рис. 5. Схема потоков жидкости в трубе за смесителем: 1 – труба; 2 – трехфазный индуктор; 3 – пристенная часть потока; 4 – центральная часть потока; 5 – ядро холодного потока; 6 – смеситель; 7 – смешение ядра и пристенного потока; 8 – вторичное перемешивание; 9 – поток нефти после перемешивания

Расчёт средней температуры потока нефти в трубопроводе после смесителя выполнен на основе составления баланса тепловых потоков.

Массовые расходы для каждого из участков потока определяются скоростью и площадью сечения. Пропорционально трём сечениям потока массовый расход $G_{тр}$ нефти в трубопроводе разделился на три величины

$$G_{тр} = G_{ст} + G_{я} + G_{к'}, \text{ кг/с.}$$

Тепловой баланс потока нефти в трубе

$$G_{тр} \cdot c_p \cdot t_i = G_{ст} \cdot c_p \cdot t_{ст} + G_{я} \cdot c_p \cdot t_{я} + G_{к'} \cdot c_p \cdot t_{к'}, \text{ кДж/с.}$$

Из условия баланса определяется средняя температура t_i массы нефти после смесителя.

Используя приведенные зависимости, при известном ограничении на температуру стенки трубы рассчитано температурное распределение в потоке нефти для нагревателя, состоящего из нескольких модулей. Температура стенки трубы поддерживается на постоянном уровне – 100 °С. Требуемая по технологии средняя температура нефти на выходе из нагревателя должна быть на уровне 50–60 °С. На рис. 6 приведены результаты расчета по приведенной методике температурных распределений в процессе нагрева нефти в многосекционном индукционном нагревателе. Здесь представлены соответственно графики температуры 1 пограничного слоя, средней температуры 2 пристенного слоя и средней температуры 3 при нагреве нефти до предельно допустимой температуры 95 °С. На оси абсцисс графика в точках 0 – 1 показана холодная нефть в трубопроводе перед подогревателем, точка 1 – вход в подогреватель. Точки 2; 3,5; 5; 6,5; 8; 9,5; 11; 12,5 соответствуют выходам из индукторов подогревателя. Точки 2,5; 4; 5,5; 7; 8,5; 10; 11,5; 13 соответствуют выходам из смесителей. Температура потока нефти, отдельные слои которого перемешаны смесителем, показана жирной линией с квадратиками рассчитанных точек. Синусообразная линия с кружками рассчитанных значений температуры в точках абсциссы 2; 3,5; 5; 6,5; 8; 9,5; 11; 12,5 описывает поведение температуры нефти в точке, соответствующей радиусу поверхностного слоя после прохождения индукторов перед входом в смесители. Пунктирная линия 2 с треугольниками точек показывает среднюю температуру пристенного слоя нефти за индукторами.

Возрастающая часть графика 1 характеризует интенсивность нагрева пограничного слоя нефти при прохождении через индукционный нагреватель, точка минимума на ниспадающей части графика 1 – среднюю температуру после смешения пограничного слоя и ядра потока. График 3 характеризует среднюю температуру

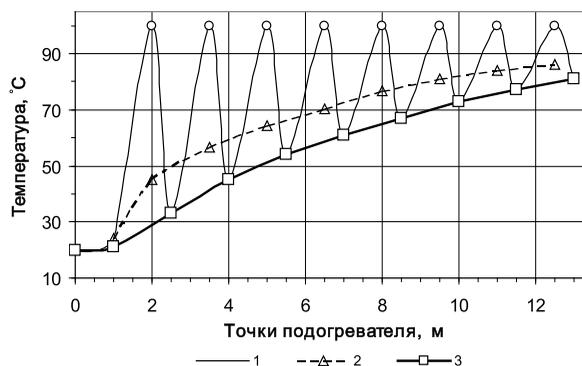


Рис. 6. Температурное распределение в потоке нефти по длине нагревателя: 1 – на границе со стенкой трубы; 2 – средняя температура пристенного слоя; 3 – средняя температура потока

нефти в процессе прохождения потока через многосекционный нагреватель. Как следует из полученных результатов, применение индукционных смесителей позволяет сократить количество секций и длину нагревательной системы на 15–20 %.

Выводы. С помощью предложенной методики исследованы термогидравлические процессы в нагревательном модуле, состоящем из индукционного нагревателя и индукционного смесителя. Полученные расчеты температуры и поля скоростей в потоке вязкой жидкости показали, что вследствие высокой вязкости и низкой теплопроводности нефти при строгом ограничении на температуру теплоносителя глубина прогрева потока нефти незначительна. Для повышения эффективности передачи тепла в последующих секциях нагревателя 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 эффективным является использование трехфазного индукционного устройства на базе асинхронного электродвигателя, совмещающего функции привода вращения ротора смесителя и нагревателя. Приведенные результаты расчета температурных распределений в процессе нагрева нефти в многосекционном индукционном нагревателе, содержащем несколько индукцион-

ных модулей, подтверждают целесообразность применения предложенной в работе модульной системы.

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. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
6. 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. (с межд. уч.). Уфа: УГНТУ, 2011. С. 211–218.
7. Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. М.: Инфра-Инженерия, 2015. 272 с.
8. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Экологические нагревательные системы для объектов транспорта и хранения нефти // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 7. С. 35–42.
9. Трофименко К.В., Шишкин Н.Д. Разработка конструкции и оценка параметров индукционного подогревателя нефти и нефтепродуктов // Вестник АГТУ. 2012. № 1 (53). С. 78–83.
10. Шишкин Н.Д. Применение индукционного подогрева нефти при её транспортировке от месторождений на Северном Каспии // Вестник АГТУ. 2011. № 3. С. 52–56.
11. 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. Серия: Технические науки. 2019. Вып. № 3 (63). С. 120–132.
12. Базаров А.А. Система индукционного нагрева движущейся жидкости // Вестник СамГТУ. Серия: Технические науки. 2005. № 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. Серия: Технические науки. 2017. № 3(55). С. 50–60.
14. Turbulent flow in closed and free surface unbaffled tanks stirred by radial impellers / M. Ciofalo, A. Brucato, F. Grisafi, N. Torracca // Chemical Engineering Science. 1996. Vol. 51. P. 3557–3573.
15. Modeling turbulent flows with free surface in unbaffled agitated vessels / J.N. Haque, T. Mahmud,

K.J. Roberts, D. Rhodes // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2006. Vol. 45. P. 2881–2891.

16. Васильцов Э.А., Ушаков В.Г. Аппараты для перемешивания жидких сред. Л.: Машиностроение, 1979. 272 с.

17. Газизуллин Н.А. Перемешивание вязкой жидкости со свободной поверхностью в аппарате с турбинной мешалкой Раштона // Вестник СамГТУ. Серия: Технические науки. 2014. № 3 (42). С. 146–155.

18. Данилушкин А.И., Кривошеев В.Е., Васильев И.В. Многосекционная установка косвенного индукционного нагрева жидкости // Вестник СамГТУ. Серия: Технические науки. 2018. Вып. № 1(57). С. 92–101.

19. Альтишль А.Д., Киселёв П.Г. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1965. 273 с.

20. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. Л.: Машиностроение, 1969. 529 с.

21. Zlokarnik M. Stirring: Theory and Practice. Weinheim: Wiley-VCH, 2001. 362 p.

22. Лыков А.В. Теплообмен: (справочник). М.: Энергия, 1978. 480 с.

23. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 2001. 712 с.

REFERENCES

1. Gubin V. E. Gubin V. V. *Truboprovodnii transport nefiti i nefteproduktov* [Pipeline transport of oil and oil products]. Moscow, Nedra Publ. 1982. 296 p.
2. *Truboprovodnii transport nefiti, sbornik nauch. trudov* [Pipeline transport of oil, Collection of Articles]. Ufa, 1987. 136p. (in Russian).
3. Tugunov P. I. *Nestacionarnie regimi perekachki nefiti* [Non-Stationary modes of oil and oil products pumping]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 224 p.
4. Nadirov N. K., Tugunov P. I. *Truboprovodnii transport vazkih neftei* [Pipeline transportation of viscous oils]. Alma-ATA, Nauka Publ., 1985. 146p.
5. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teplotperedacha* [Heat Transfer]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 416p.
6. Konesev S. G., Khlyupin P. A., Sadikov M. R. Analysis of the effectiveness of heating systems when pumping viscous oils. *Electroprivod, elec-trotehnologii i electrooborudovanie predpriatii:sbornik nauchich trudov III Vserossiskoy nauch. techn. Conferenchi* [Electric Drive, electrical technologies and electrical equipment of enterprises: materials of Scientific Conference]. Ufa, UGNTU, 2011, pp. 211-218 (in Russian)
7. Strupinsky M. L., Khrenkov N. N., Kuvaldin A. B. *Proectirovanie i ecspluatasia system elektricheskogo obogreva neftegazovoi otrasly* [Design and operation of electric heating systems in the oil and gas industry]. Moscow, Infra-Engineering Publ., 2015. 272p.
8. Konesev, S. G., Khlyupin, P. A. Environmental heating systems for oil transport and storage facilities. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life Safety], 2012, no. 7, pp. 35-42. (in Russian)

9. Trofimenko K. V., Shishkin N. D. Design development and evaluation of parameters of an induction heater for oil and petroleum products. *Vestnik AGTU* [ASTU Bulletin], 2012, no. 1 (53), pp.78-83. (in Russian)

10. Shishkin N. D. Application of induction heating of oil during its transportation from fields in the Northern Caspian. *Vestnik AGTU* [ASTU Bulletin], 2011, no. 3, pp. 52-56. (in Russian)

11. 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. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of SamSTU. Series "Technical Sciences"], 2019, no. 3 (63), pp.120-132. (in Russian)

12. Bazarov A. A. System of induction heating of a moving liquid. *Vestnik SamGTU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of SamSTU. Series "Technical Sciences"], 2005, no.37, pp. 12-17. (in Russian)

13. Bazarov A. A., Danilushkin A. I., Danilushkin V. A., Vasiliev I. V. Modeling of electromagnetic processes in a multilayer three-phase induction cylindrical system. *Vestnik SamGTU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of SamSTU. Series "Technical Sciences"], 2017, no. 3 (55), pp. 50-60. (in Russian)

14. Ciofalo M., Brucato A., Grisafi F., Torracca N. Turbulent flow in closed and free surface unbaffled tanks stirred by radial impellers. *Chemical Engineering Science*, 1996, no. 51, pp. 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, no. 45, pp. 2881-2891.

16. Vasil'tsov E. A., Ushakov V. G. *Apparaty peremeshivaniy i jidkih sred* [Apparatuses for mixing liquid media]. Leningrad, Mashinostroenie Publ, 1979. 272 p.

17. Gazizullin N. A. Mixing of a viscous liquid with a free surface in a device with a Rushton turbine agitator. *Vestnik SamGTU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of SamSTU. Series "Technical Sciences"], 2014, no. 3 (42), pp.146 – 155. (in Russian)

18. Danilushkin A. I., Krivosheev V. E., Vasiliev I. V. Multi-Section installation of indirect induction liquid heating. *Vestnik SamGTU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of SamSTU. Series "Technical Sciences"], 2018, no. 1 (57), pp.92–101. (in Russian)

19. Altshul A.D., Kiselev P. G. *Gidravlika i Aerodinamika* [Hydraulics and aerodynamics]. M., Stroizdat Publ, 1965. 273 p.

20. Povh I. L. *Tekhnicheskay gidromekhanika* [Technical hydromechanics]. Leningrad, Mashinostroenie Publ, 1969. 529 p.

21. Zlokarnik M. *Stirring: Theory and Practice* Weinheim. Wiley VCH, 2001. 362 p.

22. Lukov A.V. *Teplomassoperedacha* [Heat And Mass Transfer]. M., Energiya Publ, 1978. 480 p.

23. Kartashov E. M. *Analiticheskie metody teorii teploprovodnosti tverdykh tel* [Analytical methods in the theory of heat conductivity of solids]. M., Higher School Publ, 2001. 712 p.

Об авторах:

ДАНИЛУШКИН Александр Иванович

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

DANILUSHKIN Aleksandr I.

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

ДАНИЛУШКИН Василий Александрович

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

DANILUSHKIN Vasily A.

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

КРИВОШЕЕВ Владимир Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: krivdm@yandex.com

KRIVOSCHEEV Vladimir E.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Industrial Heat Power Engineering Chair, Samara State Technical University», Russia, 443100, Samara, St. Molodogvardeyskaya, 244, E-mail: krivdm@yandex.com

МАКСИМОВА Марина Александровна

аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарский государственный технический университет 444100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: maximova_21@yahoo.com

MAKSIMOVA Marina A.

Postgraduate Student of the Power Supply of Industrial Enterprises Chair, Samara State Technical University», Russia, 443100, Samara, St. Molodogvardeyskaya, 244, E-mail: maximova_21@yahoo.com

Для цитирования: Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Кривошеев В.Е., Максимова М.А. Электротехнический модульный комплекс для нагрева вязких жидкостей в объектах трубопроводного транспорта // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 2. С. 160–167. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.02.21.

For citation: Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Krivosheev V.E., Maksimova M.A. Electrotechnical Modular Complex for Heating Viscous Liquids in Pipeline Transport Facilities. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, Vol. 10, no. 2, Pp. 160–167. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.02.21.

Уважаемые читатели!

Гидрохимическая лаборатория приглашает к сотрудничеству.

Основные направления деятельности:

- исследование природных, сточных, поверхностных вод, грунтов и отходов

Руководитель *Гульнева Ирина Владимировна*

Контакты:

443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194, корпус 11 (АСА СамГТУ), каб. 173 тел. (846) 339-14-85 E-mail: labvv173@mail.ru