

УДК 621. 313: 621.318.122

д.т.н. Заблодский Н. Н.,  
к.т.н. Грицюк В. Ю.  
(ДонГТУ, г. Лисичанск, Украина)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ДОБЫЧИ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

*В работе методом конечных элементов проведено математическое моделирование взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в погружном электромеханическом преобразователе. Результаты свидетельствуют о высоком уровне теплового напряжения в активной части погружного ПЭМП. Температура на поверхности ротора погружного преобразователя достигает весьма высоких значений, что свидетельствует о возможности обеспечения быстрого нагрева и высокой скорости перекачки нефти и газожидкостных компонент горючих сланцев через полость внутреннего ротора погружного ПЭМП.*

**Ключевые слова:** погружной электромеханический преобразователь, коэффициент теплоотдачи, конечно-элементная модель, электромагнитное поле.

**Введение.** Термические методы широко используются при скважинных методах добычи нефти в США, России, Венесуэле, Канаде, Франции при разработках тяжелой вязкой нефти, а также при отсутствии внутрипластового давления. При этом применяют высокотемпературные агенты (пар, горячую воду, воздух, продукты сгорания нефти и газа), которые требуют громадных затрат топлива на их нагрев и энергии на транспортировку в скважину. Коэффициент нефтеотдачи при таком способе составляет 0,4-0,6 при удельном расходе пара 2,5-2,7 тонн на тонну продукта. Исследования показали, что значительное количество тепла при нагнетании теплоносителя с полевого бурового горизонта через скважины теряется в породах кровли, также вместе с извлекаемыми из пласта нефтью и горячей водой [1]. Известны технологии и устройства для электронагрева призабойных зон скважин для воспламенения нефтяного пласта в призабойной зоне при проведении процесса внутрипластового движущегося фронта горения, а также удаления парафиноасфальтовых отложений со стенок нефтегазовых скважин [2]. Однако надежность используемых трубчатых электронагревателей очень низкая. Одновременно низка и эффективность прогрева призабойной зоны

по причине слабой турбулизации газожидкостной смеси и потерь тепла за счет конвекции в верхних слоях жидкости, находящейся в скважине, либо путем теплоотдачи в породу кровли при прямом электронагреве насосно-компрессорных труб.

Новая технология ЕРІСС, предложена учеными Стэнфордского университета [3], и сочетающая производство электроэнергии с захватом и хранением под землей углекислого газа, может сделать доступными громадные (до 3 триллионов баррелей нефти) запасы энергоресурсов в виде нефтяных горючих сланцев. Горючие сланцы – трудное по своей природе технологическое сырье. Извлечение химико-технологической составляющей в настоящее время возможно за счет термической переработки сланца, а именно: нагревание сырья до тех температур, когда происходит полная деструкция керогена – в летучие вещества, которые за счет физической конденсации разделяются и используются отдельно [4]. Горючие сланцы – перспективный ресурс органического сырья и для Украины, имеющей крупные Болтышское, Ново-Дмитровское и Корнетское месторождения.

© Заблодский Н. Н., 2015

© Грицюк В. Ю., 2015

В рассматриваемой технологии для поддержания процессов термического расщепления жидких углеводородов и их транспортировки к узлам сепарации необходимы энергосберегающие электромеханические устройства.

Потребности рынка в повышении коммерческой ценности топлива, увеличения дебита нефтегазовых скважин, внедрении новой технологии получения энергии нефтяных сланцев в значительной мере могут быть решены при создании ряда погружных электромеханических преобразователей [5].

**Постановка задачи.** Погружные электромеханические преобразователи относятся к новому классу электромеханических устройств – полифункциональным электромеханическим преобразователям технологического назначения (ПЭМП). ПЭМП включают в себя ряд модификаций электромеханических преобразователей различного применения, имеющих общую техническую основу и единую идеологию создания.

Принципы создания ПЭМП можно разделить на следующие группы:

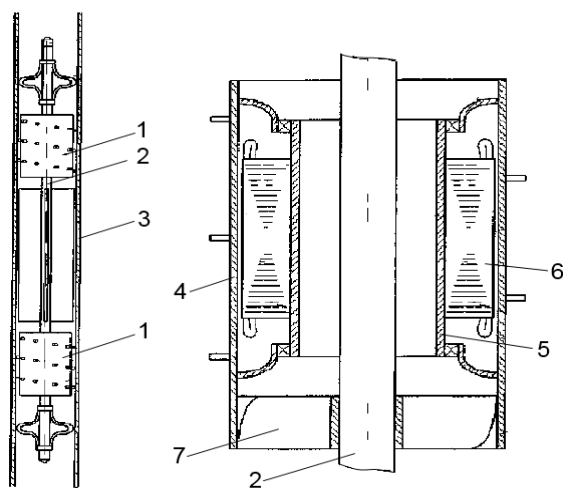
- структурной и функциональной интеграции;
- интеграции тепловых процессов;
- саморегуляции по разделению на составляющие полезной мощности;
- безредукторного обеспечения малой частоты вращения и кратного деления вращающего момента;
- не критичности к качеству энергии источника питания по гармоническому составу.

Принципы структурной и функциональной интеграции ПЭМП заключаются в совмещении технической системы, объединяющей электромеханическую, механическую и тепловые подсистемы для реализации интегральной целевой функции по совокупности функциональных признаков приводного двигателя, исполнительного механизма и нагревателя. Целью интеграции тепловых процессов является форми-

рование возможностей отбора тепла от источников потерь в ПЭМП, координация тепловых потоков, сформированных при целевом преобразовании электроэнергии в тепловую и канализация ее в звенья технологической цепи, где требуется нагрев рабочих поверхностей и объемов. Принцип саморегуляции по разделению на составляющие полезной мощности определяет механизм долевого распределения электромагнитной мощности преобразователя на два полезных потока выходной мощности: поток механической мощности и поток тепловой мощности.

Общий КПД ПЭМП весьма высок, что обеспечивает эффективную реализацию принципов энергоресурсосбережения. Существенными преимуществами технологий на основе ПЭМП является не только высокое значение КПД, но и значительные сокращения производственной площади, количества единиц оборудования и сроков его окупаемости [5].

На рисунке 1 представлено устройство для удаления парафиноасфальтовых отложений со стенок нефтегазовых скважин [6].



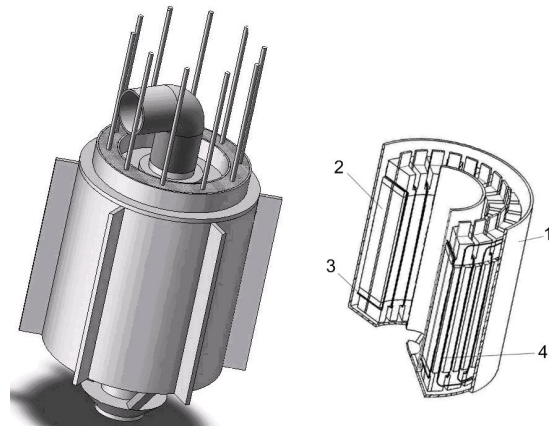
1 – вращающиеся турбины; 2 – корпус;  
3 – трубопровод; 4 – внешний цилиндр вращающейся турбины; 5 – внутренний цилиндр вращающейся турбины; 6 – цилиндрическая обмотка индуктора; 7 – колесо обратного вращения

Рисунок 1 – Устройство для удаления парафиноасфальтовых отложений со стенок нефтегазовых скважин

Ряд модификаций погружных ПЭМП могут выполняться с обмотками кольцевого типа. При этом появляется возможность использования лобовых частей не только для формирования результирующего электромагнитного момента, но и обеспечения дополнительной греющей мощности в торцевых зонах преобразователя. Обмотка кольцевого типа укладывается в пазовую зону по всей длине, следовательно, лобовые части в такой обмотке отсутствуют, а длина активной части увеличивается. Применение кольцевых обмоток статора – это новое техническое решение, сопровождаемое значительным увеличением коэффициента использования активных материалов и повышением технико-экономических показателей.

На рисунке 2 показан общий вид, а также активная часть погружного преобразователя с обмоткой кольцевого типа, предназначенного для переработки, добычи и транспортировки вязких нефтепродуктов [7]. В рассматриваемом устройстве используется полый ферромагнитный коаксиальный ротор, выполняющий одновременно функции ротора асинхронного двигателя, нагревателя, исполнительного механизма и защитного корпуса. Транспортируемый материал выступает в двух качествах: механическая нагрузка для ротора, создаваемая силами вязкого трения материала; охлаждающая среда, которая омывает ротор и отбирает от него тепловую энергию.

Основой для исследования процессов в новых электромеханических устройствах является математическое моделирование электромагнитных и тепловых полей. Полученные с помощью математической модели данные о распределении электромагнитного и теплового поля позволяют на предварительном этапе определить оптимальные геометрические размеры активной части преобразователя и оценить его рабочие свойства и характеристики.



1 – полый ферромагнитный коаксиальный ротор; 2 – пакет статора с обмотками; 3 – кольцевая обмотка; 4 – внешняя обмотка барабанного типа

Рисунок 2 – Общий вид и активная часть погружного преобразователя с обмоткой кольцевого типа

Задачей данной работы является проведение математического моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в погружном ПЭМП с целью определения оптимальных электромагнитных характеристик, а также максимального турбулентно-формирующего и теплового воздействия на вязкие нефтепродукты и газожидкостные компоненты горючих сланцев.

Одним из наиболее эффективных численных методов решения полевых задач является метод конечных элементов. Достоинством этого метода является сравнительная простота и точность описания достаточно сложных конфигураций границ раздела сред, возможность учета нелинейности свойств материалов и т.п.

**Изложение материала и анализ.** В общем виде дифференциальное уравнение электромагнитного поля в частных производных относительно векторного магнитного потенциала  $\vec{A}$  имеет следующий вид:

$$\frac{1}{\mu} \Delta \vec{A} - \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \gamma (\vec{v} \times \text{rot} \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{стоп}}, \quad (1)$$

где  $\mu$  и  $\gamma$  – магнитная проницаемость и электропроводность участков среды в пре-

делах расчетной области;  $\vec{J}_{стор}$  – значение плотности сторонних токов;  $\vec{v}$  – скорость движения электропроводного тела относительно источника магнитного поля.

Уравнения электромагнитного поля дополняются граничными условиями – нулевым значением векторного магнитного потенциала или его нормальной производной на внешних границах расчетной области, отображающей активную зону ПЭМП. Такими границами для погружного ПЭМП являются – внешние поверхности коаксиального массивного ротора. На этих поверхностях задаются однородные граничные условия первого рода:

$$A(x, y, t) = 0. \quad (2)$$

Задание граничного условия (2) эквивалентно принятию допущения об отсутствии магнитных потоков рассеяния во внешнее пространство через рассматриваемые границы.

При решении нестационарного полевого уравнения необходимо задать начальные условия – значения искомой функции внутри области в начальный расчетный момент времени  $t_0$ :

$$A(x, y, z, t)|_{t=t_0} = A_0(x, y, t_0). \quad (3)$$

При анализе характерных для погружных ПЭМП динамических процессов, например пуска, обычно задается однородное начальное условие  $A_0(x, y, t_0) = 0$ .

Для определения индуцированной в роторе плотности тока может быть использовано следующее выражение, вытекающее из первого выражения системы уравнений Максвелла:

$$J_z = \text{rot}_z H = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right). \quad (4)$$

После расчета поля векторного магнитного потенциала находится полное магнитное потокосцепление всех фаз обмотки статора по следующему выражению:

$$\psi_k = \frac{2l_a w_{II}}{S_{II}} \int_{S_A} A_z \cdot ds, \quad (5)$$

где  $l_a$  – активная длина статора;  $w_{II}$  – число проводников в пазу;  $S_{II}$  – площадь паза;  $S_A$  – площадь интегрирования, состоящая из суммарной площади поперечного сечения сторон всех последовательно соединенных катушек фазы, имеющих ток одного направления.

В каждой точке ротора удельные потери рассчитываются по выражению:

$$Q = J_z^2 / \gamma(T), \quad (6)$$

где  $\gamma$  – электропроводность материала ротора, зависящая от температуры  $T$  по закону:

$$\gamma(T) = \gamma_0 / (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (7)$$

где  $\gamma_0$  – электропроводность “холодного” ротора;  $T_0$ ,  $T$  – температура окружающей среды и температура материала ротора;  $\alpha$  – температурный коэффициент.

Дифференциальное уравнение теплового поля в частных производных относительно температуры  $T$  имеет следующий вид:

$$\lambda \Delta T - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q, \quad (8)$$

где  $\lambda, c, \rho$  – соответственно теплопроводность, теплоемкость и плотность материала;  $Q$  – удельные тепловые потери, рассчитываемые по выражению (6).

В декартовых координатах для двумерной картины поля уравнение (8) переписывается в следующем виде:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q. \quad (9)$$

Взаимосвязь уравнений электромагнитного и теплового полей проявляется во взаимном влиянии температуры, электропроводности, плотности вихревых токов и удельных тепловых потерь. Также как и

для уравнения электромагнитного поля для уравнения (9) задаются граничные и начальные условия. Выбор граничных условий обусловлен особенностями охлаждения ротора ПЭМП. При построении математической модели предполагается, что основная теплопередача в нагрузочно-охлаждающую среду выделившейся в активных элементах ПЭМП тепловой энергии осуществляется путем конвективного теплообмена между нагретой поверхностью и нагрузочно-охлаждающей средой в жидком состоянии описывается выражением (10). Подобная теплопередача происходит в соответствии с законом Ньютона-Рихмана:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{k}{\lambda}(T - T_0), \quad (10)$$

где  $k$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_0$  – температура охлаждающего воздуха.

Граничное условие (10) задается на внешних поверхностях ротора. С физической точки зрения наиболее адекватным является предположение о передаче всех выделившихся в роторе джоулевых потерь жидкому материалу в виде теплового потока через поверхность. Кондуктивному теплообмену в твердом состоянии, соответствует граничное условие второго рода, которое задает среднюю величину теплового потока на границах расчетных области ротора:

$$\begin{aligned} q_1|_{G1} \frac{1}{R_{2n1} S} \int Q ds &= \frac{1}{R_{2n1} S1} \int [J_{z1}^2 / (\gamma) T] ds \\ q_2|_{G2} \frac{1}{R_{2n2} S} \int Q ds &= \frac{1}{R_{2n2} S2} \int [J_{z2}^2 / (\gamma) T] ds \end{aligned} \quad (11)$$

где  $R_{2n1}, R_{2n2}$  – наружный радиус внешнего и внутреннего ротора;  $S$  – область интегрирования.

Для повышения точности математической модели внесены функциональные зависимости температурных коэффициентов активных материалов в зависимости от температуры  $\alpha_{стали}(t)$ ,  $\alpha_{меди}(t)$ , зависимости магнитной проницаемости электротехни-

ческой стали от величины магнитной индукции  $\mu(B)$ , коэффициентов теплопроводности стали, воздуха, нагрузочно-охлаждающей среды в зависимости от температуры  $k_{стали}(t)$ ,  $k_{возд}(t)$ ,  $k_{н.с.}(t)$ .

Геометрия модели погружного ПЭМП представляет собой четверть поперечного сечения реальной восьмиполюсной конструкции. Конечно-элементная сетка модели представлена на рисунке 3.

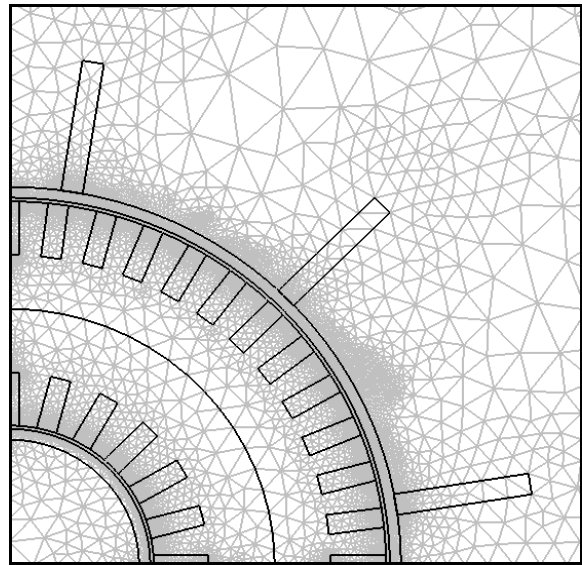


Рисунок 3 – Конечно-элементная сетка модели погружного ПЭМП

На рисунках 4, 5 представлены результаты моделирования электромагнитного поля погружного ПЭМП, работающего в режиме короткого замыкания (стоянка под током). Полученные результаты свидетельствуют о том, что в этом режиме магнитное поле проникает на небольшую глубину массива (2-3 мм) со стороны внутренней поверхности наружного и внутреннего цилиндров. При этом величина индукции в роторе достигает значений 2,1-2,2 Тл. Радиальная линия, вдоль которой построен график распределения нормальной составляющей магнитной индукции (рис. 5) проходит через участок внутреннего ферромагнитного ротора, воздушный зазор, зубцы и ярмо статора, а также через зазор и участок внешнего ротора.

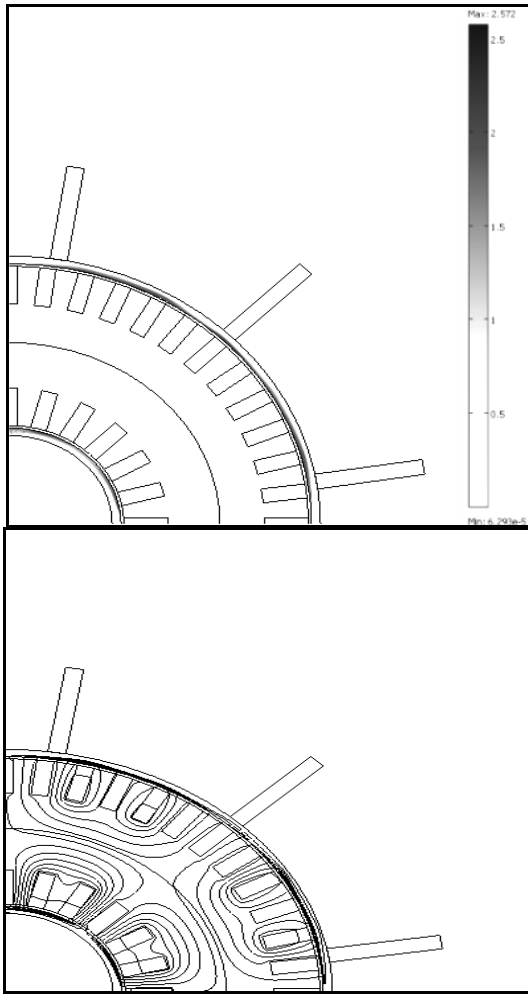


Рисунок 4 – Картина распределения нормальной составляющей магнитной индукции и векторного магнитного потенциала в активной части погружного ПЭМП

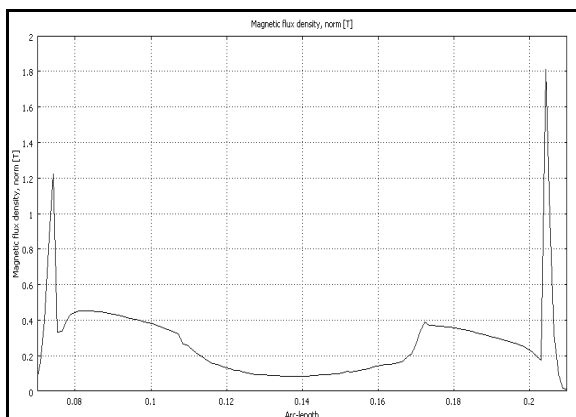


Рисунок 5 – Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль радиуса погружного ПЭМП

Результатом расчета электромагнитной задачи является величина мощности тепловых потерь, использованная для расчета картины теплового поля погружного ПЭМП, а также данные по распределению магнитной индукции и вихревых токов в роторе, использованные для расчёта величины электромагнитного момента. Картина теплового поля погружного ПЭМП показана на рисунке 6.

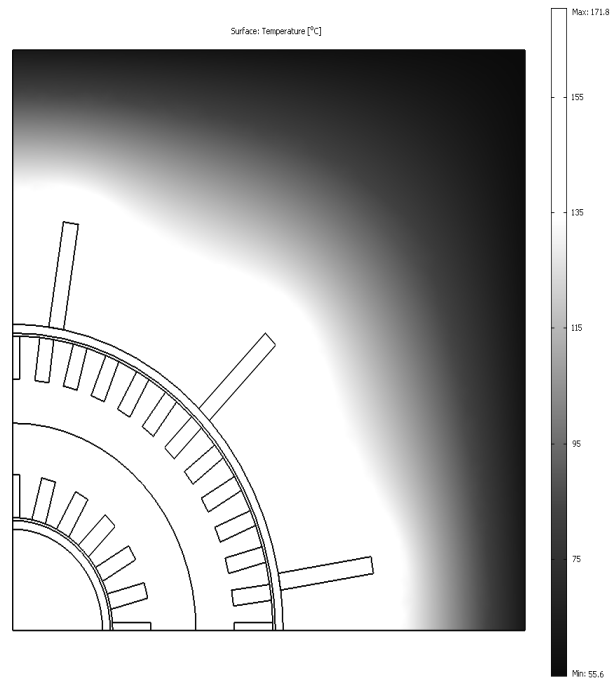


Рисунок 6 – Картина теплового поля погружного ПЭМП

Полученные результаты свидетельствуют о высоком уровне удельных тепловыделений в активной части погружного ПЭМП. Так, главными источниками тепловыделений за счет протекающих вихревых токов являются внешний и внутренний цилиндры ферромагнитного ротора. Температура на их поверхности в режиме стоянки под током достигает значения  $160-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что позволяет говорить о возможности обеспечения быстрого нагрева и высокой скорости перекачки нефти и газожидкостных компонент горючих сланцев через полость внутреннего ротора погружного ПЭМП. Температура охлаждающей жидкости вблизи поверхности ротора составляет  $145-155\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вместе с тем,

расчетные данные показали, что результирующее значение электромагнитного момента двух цилиндрических частей ротора ПЭМП достигает 143 Н·м. Это, в свою очередь свидетельствует об удовлетворительных турбулентноформирующих свойствах погружного преобразователя.

**Выводы.** В работе методом конечных элементов проведено математическое моделирование взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в по-

гружном ПЭМП. Полученные результаты свидетельствуют о высоком уровне удельных тепловыделений в активной части погружного ПЭМП. Температура на поверхности ротора в режиме стоянки под током достигает значения 160-170 С°, что позволяет обеспечить быстрый нагрев и высокую скорость перекачки нефти и газообразных компонент горючих сланцев через полость внутреннего ротора погружного ПЭМП.

### Бібліографічний список

1. Минаев Ю. Л. Шахтная нефтедобыча: учебное пособие / Ю. Л. Минаев. – СПб.: СПбГГИ им. Г. В. Плеханова (техн. ун-т), 2001. – 88 с.
2. Миронов Ю. Л. Оптимизация установок электронагрева для очистки нефтяных скважин от парафина / Ю. Л. Миронов, А. Г. Иванов, В. Л. Арзамасов // *Электричество*. – 2001. – № 6.
3. Brandt A. Oil shale as an energy resource in a CO<sub>2</sub> constrained world: the concept of electricity production with in situ carbon capture / Brandt A. & Mulchandani H // *Energy & Fuels* – 2011. – № 25.
4. Осипов А. М. Горючие сланцы – перспективный ресурс природного органического сырья в Украине / А. М. Осипов, Т. Г. Шендрик, С. В. Грищук // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. – 2013. – № 6. – С. 3-9.
5. Заблодский Н. Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения: монография / Н. Н. Заблодский. – Алчевск: ДонГТУ, 2008. – 340 с.
6. Пат. 49409 Україна, 7 E21B 37/00. Пристрій для видалення парафіну зі стінок нафтогазових свердловин // Заблодський М. М., Захарченко П. І. та інші.; заявник і патентовласник Донбас.держ.техн.ун-т. – № 2001128246; заявл. 03.12.2001; опубл. 15.10.2004, Бюл. №10, 2004.
7. Пат. 39226 Україна, МКИ 7H05B 6/10. Заглибний електронагрівач / Заблодський М. М., Верімієнко В. І.; заявник і патентовласник Донбас.держ.техн.ун-т. – № 98031637; заявл. 31.03.1998; опубл. 15.06.2001, Бюл. № 5, част. 1. – 2001.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. ДонГТУ Паэрандом Ю. Э., д.т.н., проф. НТУ «ХПИ» Павленко Т. П.*

Статья поступила в редакцию 28.05.15.

д.т.н. Заблодський М. М., к.т.н. Грищук В. Ю. (ДонДТУ, м. Лисичанськ, Україна)

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ЗАГЛИБНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИДОБУТКУ ГОРЮЧИХ СЛАНЦІВ

У роботі методом кінцевих елементів проведено математичне моделювання взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів в заглибному електромеханічному перетворювачі. Результати свідчать про високий рівень теплового навантаження в активній частині заглибного ПЕМП. Температура на поверхні ротора заглибного перетворювача досягає досить високих значень, що свідчить про можливість забезпечення швидкого нагріву та високої швидкості перекачування нафти і газорідних компонент горючих сланців через порожнину внутрішнього ротора заглибного ПЕМП.

**Ключові слова:** заглибний електромеханічний перетворювач, коефіцієнт тепловіддачі, кінцево-елементна модель, електромагнітне поле.

Doctor of science Zablodskiy M. M., PhD Grytsiuk V. Yu. (DonSTU, Lisichansk, Ukraine)

## MODELING THE PROCESSES IN SUBMERSIBLE ELECTROMAGNETIC TRANSDUCERS FOR OIL SHALE MINING METHODS

*In the paper using finite elements method there was made mathematical modeling of related electromagnetic and heat processes in submersible electromagnetic transducer (SEMT). The results show high level of thermal stress in active part of SEMT. Temperature on the rotor surface of SEMT is rather high that confirms the opportunity to provide quick heating and high pumping speed of oil and gas-liquid components of oil shale through the hole of internal rotor of SEMT.*

**Key words:** *submersible electromagnetic transducer, heat exchange index, finite-element model, electromagnetic field.*