

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Вологодский государственный университет

**XIV ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНАЯ СЕССИЯ
АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

**Материалы
межрегиональной научной конференции**

**Том I
Технические и естественные науки**

Вологда
2020

УДК 001(06)
ББК 72
Ч-54

Утверждено экспертным советом по научной литературе ВоГУ

Редакционная коллегия:

В. Н. Маковеев (главный редактор), А. М. Прахова,
В. А. Горбунов, Г. А. Сазонова, В. А. Раков, А. Н. Алюнов, А. А. Сеницын,
С. В. Колобова, Н. М. Дементьев, И. С. Казакова, С. Н. Рыбаков,
С. М. Хамитова, М. А. Иванова, Ю. Н. Белова, Н. А. Зейслер

XIV Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых :
Ч-54 материалы межрегиональной научной конференции : в 3 т. / Министерство
науки и высшего образования Российской Федерации, Вологодский го-
сударственный университет ; [главный редактор В. Н. Маковеев]. –
Вологда : ВоГУ, 2020. – Т. 1: Технические и естественные науки. –
579 с. : ил.

ISBN 978-5-87851-929-8

ISBN 978-5-87851-930-4 (т. 1)

В сборнике представлены результаты научных исследований молодых ученых, аспирантов, магистрантов, студентов старших курсов вузов Вологодской области и других регионов Российской Федерации по проблемам информационных систем и технологий, машиностроения, электроэнергетики, строительства, архитектуры, экологии, биологии.

УДК 001(06)
ББК 72

ISBN 978-5-87851-930-4 (т. 1)
ISBN 978-5-87851-929-8

© ФГБОУ ВО «Вологодский
государственный университет», 2020

Уважаемые коллеги!

Сегодня, чтобы быть конкурентоспособным на рынке труда, выпускник университета должен не только владеть необходимым объемом специальных знаний, но и определенными навыками творческого решения практических задач, уметь достаточно быстро адаптироваться к изменяющимся условиям. В связи с этим приобретает актуальность концептуальный принцип «Образование – через науку».

Для реализации этого принципа на базе Вологодского государственного университета ежегодно проводятся научные Сессии аспирантов и молодых ученых.

В 2020 году Сессия состоялась в 14-й раз в период с 24 по 27 ноября. В рамках Сессии студенты, аспиранты, молодые ученые Вологодской области и других регионов Российской Федерации могли продемонстрировать свои научные результаты и обменяться опытом.

Всего в 2020 году в рамках Сессии состоялось 14 научных мероприятий, основными из которых выступили: Всероссийская научная конференция, финальный этап конкурса инновационных проектов Программы «УМНИК». В работе Сессии приняли участие свыше 450 человек из 48 учебных заведений и организаций Вологды, Череповца, Москвы, Санкт-Петербурга, Казани, Иркутска, Ярославля, Ивана и других городов.

Более 390 участников Сессии получили возможность информирования научной общественности о результатах своих исследований в рамках секций конференции по 20 направлениям технических, общественных, гуманитарных и естественных наук, а также во время защиты инновационных проектов по программе Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «Участник молодежного научного инновационного конкурса» (У.М.Н.И.К.).

По итогам докладов и выступлений участников Всероссийской научной конференции – основного научного мероприятия Сессии – был составлен данный сборник научных трудов.

Надеюсь, что результаты научно-исследовательской деятельности участников Сессии, представленные в докладах, инновационных проектах и опубликованные в этом сборнике, не только продемонстрируют высокий интеллектуальный потенциал молодежи, но и вызовут интерес в научных и деловых кругах, внесут весомый вклад в социально-экономическое развитие территорий и повышение качества и уровня жизни населения.

*Председатель Программного комитета
кандидат экономических наук
В. Н. Маковеев*

ЦИФРОВАЯ МЕХАТРОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ПАРАФИНА ИЗ НЕФТИ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Б.Р. Сафиуллин

*Научный руководитель Р.С. Кашаев, д-р. техн. наук, профессор
Казанский государственный энергетический университет
г. Казань*

Целью настоящей работы является разработка структурно-технологической схемы универсальной мехатронной установки и способа удаления примесей (парафина) из нефти с непрерывным проточным контролем и управлением от аппаратно-программного комплекса (АПК) и моделирование скорости вращения ферромагнитного ротора АДФМР, предотвращающее образование цепочек капель воды между электродами, формирующими неоднородное электрическое поле.

Обычно подготовка сырой нефти и водо-нефтяной эмульсии (ВНЭ) на стадиях очистки от основных важных для технологии переработки нефти примесей (воды, солей, парафина и др.) включает в себя операции: термическое воздействие; обработка реагентами; удаление эмульгированной воды (раствора с реагентом) в процессе электрической обработки; отстаивание в ёмкостях. Для этого используются электродегидраторы. Наиболее важной стадией является удаление воды и водного раствора реагентов из ВНЭ. Но в настоящее время процесс на нефтепромыслах не обеспечивает подготовку сырой нефти по ГОСТ Р 51858-2002 и необходима дополнительная очистка нефти на нефтеперерабатывающих заводах. Причина – образование цепочек из капель воды, по которым идет разряд между электродами, снижающий напряженность электрического поля, а также недостаточный контроль физико-химических свойств сырой нефти и ВНЭ в процессе ее подготовки.

Для обезвоживания и обессоливания ВНЭ наибольшее практическое применение в парках подготовки нефти и на нефтеперерабатывающих заводах нашёл способ ее обработки во внешнем переменном электрическом поле напряжённостью $E_0 = 15–33$ кВ, используемый в электрообезвоживающих установках (ЭЛОУ), наиболее продвинутой из которых является установка Швецова с сотрудниками.

Для контроля и управления процессом, исследования по патенту РФ № 2411508 показывают, что из всех известных методов ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР) является, пожалуй, единственным, способным одновременно контролировать концентрации воды W в ВНЭ, парафина P , вязкости η^{20} , плотности ρ^{20} в нефти, а также дисперсность $D_{СА}$ (среднеарифметический диаметр капель воды/раствора реагента), что важно для процессов

очистки. Контроль можно осуществлять с помощью проточного ПМР экспресс-анализатора в составе АПК Козелков и др.

Предложена установка по удалению парафина введением вращающегося магнитного поля (ВМП), создаваемого статорными обмотками АДФМР.

Процесс удаления парафина в установке включает стадии:

1. Входной контроль физико-химических свойств сырья (концентрации парафина $П$, воды W и плотности ρ_H нефти) экспресс-методом в проточном АПК 14, 15 путем:

- предварительного измерения эффективных времен спин-спиновой релаксации чистой воды $T_{2В}$ и чистой нефти/нефтепродукта $T_{2Н}$ во временном интервале $t = 2N\tau$, где N – число импульсов в последовательности $90^\circ\text{-}\tau\text{-}[180^\circ\text{-}2\tau]_N$;

- измерении эффективного T_2^* времени релаксации в контролируемой ВНЭ;

- определению влажности нефти по формулам:

$$W_{\text{ПМР}} = T_{2В} (T_2^* - T_{2Н}) 100\% / T_2^* (T_{2В} - T_{2Н}), \quad (1)$$

где число 180° -х импульсов N выбирается из формулы:

$$N = k_3 \rho_H - k_4, \quad (2)$$

где k_3 и k_4 – коэффициенты, зависящие от месторождения.

Погрешность однократных проточных измерений составляет $\pm 2.75\%$.

2. Снижение W в нефти/нефтепродукте в блоке для удаления воды и разделения фаз во вращающихся магнитном и неоднородных электрических полях.

3. Непрерывный контроль дисперсности в распределении капель раствора в эмульсии методом ЯМР по среднеарифметическому диаметру $D_{CA}(\text{мкм}) = \sum N_i D_i / \sum N_i$. Исследования показали, что зависимость D_{CA} от времен спин-решеточной $T_{1В}$ релаксации воды с коэффициентом регрессии $R^2 = 0,95$ описывается соотношением:

$$D_{CA} = 0,1645 \cdot \exp(2,85 \cdot T_{1В}). \quad (3)$$

4. Альтернативный контрольный анализ дисперсности осуществляется также на микроскопе *Microscope MC-300 (Austria)*.

5. Водная фракция смеси, образующаяся в результате реакции при перемешивании в блоке эмульгирования нефти с реагентом, из блока удаляется в блоке при непрерывном ПМР экспресс-контроле концентрации $П$ в АПК.

6. Блок также может заменить дистилляционную установку для удаления комплексов $П$ при депарафинизации способом.

7. Конечный контроль нефти, нефтепродукта на концентрацию $П$ и зачка ее в нефтепровод, либо направление на новый цикл очистки от $П$.

Технические преимущества установки ВНЭ: возможность автоматического многопараметрического ЯМР экспресс-контроля и управления процессом удаления или снижения концентрации $П$, широкий диапазон измерений $П$.

В качестве источника ВМП нами был использован асинхронный двигатель с ферромагнитным ротором (АДФМР). В качестве ротора выступает стальной стержень из мягкой электротехнической стали. В воздушном зазоре $\delta = 0,1-0,9$ мм большинства электрических машин значение магнитной индукции лежит в пределах $0,6-1$ Тл с номинальным скольжением $s = 0,7-0,9$. Но так как нами в качестве машины, создающей ВМП, используется статор АДФМР, его номинальное скольжение находится в пределах $s = 0,3-0,4$. Ротор в использованном нами двигателе имеет диаметр $D = 0,03$ м (при диаметре внутренней стороны статора $0,07$ м), т.е. зазор равен $\delta = 0,02$ м для возможности размещения конических электродов для создания неоднородных электрических полей. Уменьшение D ведет к снижению индукции магнитного поля B_0 между статором и ротором до $B_0 = 0,74$ Тл ввиду обратной пропорциональности B_0 величине δ .

Зависимость $B(D)$ может быть описана с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,996$ уравнением:

$$B(\text{Тл}) = 0.5 + 7.6D (\text{м}). \quad (4)$$

Для того, чтобы определить, как скажется изменение диаметра ротора такой машины на скольжении s ферромагнитного ротора (и соответственно на угловой скорости вращения ротора ω_2), воспользуемся уравнением для активного сопротивления ротора из ферромагнитного материала:

$$R = 1.4 \cdot 4 \cdot m_1 l_1 w_{\text{эл}}^2 k_{\text{л,с}} \sqrt{[\omega_1 \mu_0 \mu \rho (2s)^{-1}] / (\pi D)}, \quad (5)$$

где $m_1 = 3$ число фаз обмотки статора, $l_1 = 0,1$ – длина ротора, $w_{\text{эл}}$ – эффективное число витков фазы обмотки статора, $k_{\text{л,с}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления ротора за счет лобовых частей ротора (ротор гладкий, считаем $k_{\text{л,с}} = 1$), $\omega_1 = 2\pi n / 60 = 6,28 \cdot 1500 / 60 = 157$ рад/с – угловая скорость вращения ВМП, магнитная постоянная $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$, относительная магнитная проницаемость на поверхности ротора $\mu = 200$, $\rho = 1,3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м – удельное электрическое сопротивление стали.

Уравнение (5) преобразуем к виду, удобному для расчетов скольжения s :

$$s = 5,6^2 m_1^2 l_1^2 w_{\text{эл}}^2 \omega_1 \mu_0 \mu \rho / 2R^2 \pi^2 D^2 = 7200 / D^2. \quad (6)$$

Рассчитаем значения скольжения s для разных диаметров D ротора. Видно, что с уменьшением D скольжение растет по уравнению (7):

$$s = 3,03 \cdot \exp(-46,3D). \quad (7)$$

С другой стороны, подставив (4) зависимости $B(D)$ в (7), получим зависимость $s(B)$, которая описывается уравнением:

$$s = 8,9 \exp(-3,52B). \quad (8)$$

Видим, что с ростом B скольжение падает, что физически вполне объяснимо ввиду меньшего запаздывания скорости ω_2 вращения ротора от ω_1 .

Анализ динамических свойств АДФМР является достаточно сложной задачей в связи с существенной нелинейностью уравнений, обусловленной наличием произведений переменных. В этой связи, удобную форму математического описания дают уравнения относительно производной потокосцепления:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{1x}}{dt} &= u_{1x} - \frac{R_1 L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1x} + \frac{R_1 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2x} + \omega_{0\text{эл}} \Psi_{1y}; \\ \frac{d\Psi_{1y}}{dt} &= u_{1y} - \frac{R_1 L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1y} + \frac{R_1 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2y} - \omega_{0\text{эл}} \Psi_{1x}; \\ \frac{d\Psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R'_2 L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2x} + \frac{R'_2 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1x} + (\omega_{0\text{эл}} - \omega_{\text{эл}}) \Psi_{2y}; \\ \frac{d\Psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R'_2 L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2y} + \frac{R'_2 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1y} - (\omega_{0\text{эл}} - \omega_{\text{эл}}) \Psi_{2x}; \\ M &= \frac{p_{\text{п}} L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} (\Psi_{1y} \Psi_{2x} - \Psi_{1x} \Psi_{2y}). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В приведенных уравнениях индексы 1 соответствуют обмотке статора, а индексы 2 – токам в роторе. Структурная схема электромеханического преобразования энергии в АДФМР по (9), реализованная в среде *Mat Lab Simulink*, позволяет проанализировать тенденции изменения выходных координат АДФМР при изменениях диаметра ферромагнитного ротора D .

Данные с максимальным отклонением $\Delta\omega_i = 0,06$ рад/с совпадают с известными данными. Видим, что со снижением диаметра ротора снижается и угловая скорость его вращения с $\omega_1 \approx 260$ рад/с до $\omega_2 \approx 75$ рад/с. Переходный процесс идет в колебательном режиме в течение времени $t \approx 8,5$ с с размахом, не превышающим $\pm 2\%$.

Выводы:

1. Предложена установка по удалению парафина из сырой нефти воздействием вращающегося магнитного поля, создаваемого статорными обмотками асинхронного двигателя с ферромагнитным ротором и неоднородных электрических (НЭ) полей.

2. Описана структурная схема установки и этапы процесса удаления парафина.
3. Получены уравнения, связывающие скольжение s с диаметром D ротора АДФМР и магнитной индукцией B_0 в зазоре между статором и ротором.
4. По уравнениям относительно производной потокосцепления в *Mat Lab Simulink* составлена структурная схема преобразования энергии в АДФМР.
5. Смоделировано изменение скорости ω_2 вращения ротора АДФМР в зависимости от его диаметра D . Наблюдается 3,5-кратное уменьшение ω_2 при уменьшении диаметра D ротора с 0,06 м до 0,03 м.

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОПОРЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ

И.Н. Смирнов

*Научный руководитель С.Л. Шишигин, д-р техн. наук, профессор
Вологодский государственный университет
г. Вологда*

Удар молнии в вершину опоры или грозозащитный трос приводит к возникновению тока. Частично ток через заземлитель стекает в землю, а оставшая часть по грозозащитному тросу отправляется в соседние опоры и так же через их заземлители попадает в землю, кроме того, возможно перекрытие изоляции – в этом случае волна перенапряжения полетит к подстанции. Таким образом, для моделирования процесса растекания тока молнии через опоры требуется рассмотреть расчётную модель воздушных линий электропередач, содержащую множество элементов. Каждая опора представляет собой сложную конструкцию, состоящую из множества металлических уголков, поэтому чтобы проводить серию вариантных расчётов необходимо упростить расчётную модель, которая бы обладала такой же частотной характеристикой, что и реальная опора.

Целью настоящей работы является расчёт частотной характеристики стандартной металлической опоры 110–220 кВ и нахождение её упрощённой расчётной модели, обладающей той же частотной характеристикой, что и реальная опора.

Конструкция типовой опоры 110–220 кВ представлена на рисунке 1, роль заземлителя выполняет фундамент, состоящий из плиты и стойки. В качестве расчётной модели будем рассматривать один стержень, диаметр которого подлежит определению.