

# ОТ КАЧЕСТВЕННЫХ МАГНИТОВ – К ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМ ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМ ООО «ЭПУ-ИТЦ»

**КАТАЕВ Александр Андреевич**  
Главный контролер ООО «ЭПУ-ИТЦ»

**ХУЗИН Азат Ринатович**  
Главный инженер ООО «ЭПУ-ИТЦ»

**Д**ля производства вентильных электродвигателей (ВЭД) ООО «ЭПУ-ИТЦ» ежегодно требуется порядка 40 т постоянных самарий-кобальтовых магнитов, а с учетом роста производства эта цифра вскоре вырастет до 80-90 т. Вместе с тем отечественная промышленность готова предложить не более 12 т магнитов данного типа в год. Это обуславливает необходимость закупки постоянных магнитов в Китае, где сосредоточена половина мировых запасов требуемого для их производства сырья и почти 90% мирового производства самих магнитов. С целью налаживания поставок магнитов специалисты ООО «ЭПУ-ИТЦ» тщательно изучили китайский рынок, определили жесткие требования к продукции и организовали уникальную систему входного контроля. Это позволило обеспечить высокое качество поставляемых магнитов и, соответственно, повысить энергоэффективность и надежность работы ВЭД.

В 1998 году в рамках действовавшего в то время корпоративного проекта ПАО «ЛУКОЙЛ» был изготовлен первый в мире работоспособный образец ВЭД для привода УЭЦН, а в 2001 году на производственных площадях ЗАО «ЛУКОЙЛ ЭПУ Сервис» началось серийное производство ВЭД.

Позже производить ВЭД начали и другие компании: в 2005 году – ООО «ПК «Борец», в 2007 году – АО «Но-

вомет-Пермь, в 2013 году – компания «Шлюмберге» (Schlumberger) и в 2016 году – ООО «Алмаз».

В 2013 году международная ассоциация производителей нефти и газа (OGP) и Международная организация по стандартизации (ISO) включили в новый стандарт УЭЦН (International standard ISO/DIS 15551-1 Electric submersible pump systems for artificial lift) погружные ВЭД, разработанные в рамках корпоративного проекта ПАО «ЛУКОЙЛ».

Благодаря своим характеристикам ВЭД уже давно вошли в ряд востребованного нефтедобывающего оборудования как на внутреннем российском рынке, так и за рубежом. ВЭД отличаются повышенным ресурсом работы и потребляют на 15-20% меньше электроэнергии по сравнению с асинхронными двигателями. Несмотря на то, что стоимость ВЭД выше, чем асинхронного двигателя, эти расходы окупаются менее чем через полтора года эксплуатации.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ ВЭД

На обмотку статора ВЭД по специальному алгоритму подается напряжение, и под действием электрического тока вокруг проводников обмотки статора возникает электромагнитное поле. В свою очередь, постоянные магниты, расположенные в роторе, также создают собственное магнитное поле. Взаи-

**Рис. 1. Магнитная схема ВЭД**

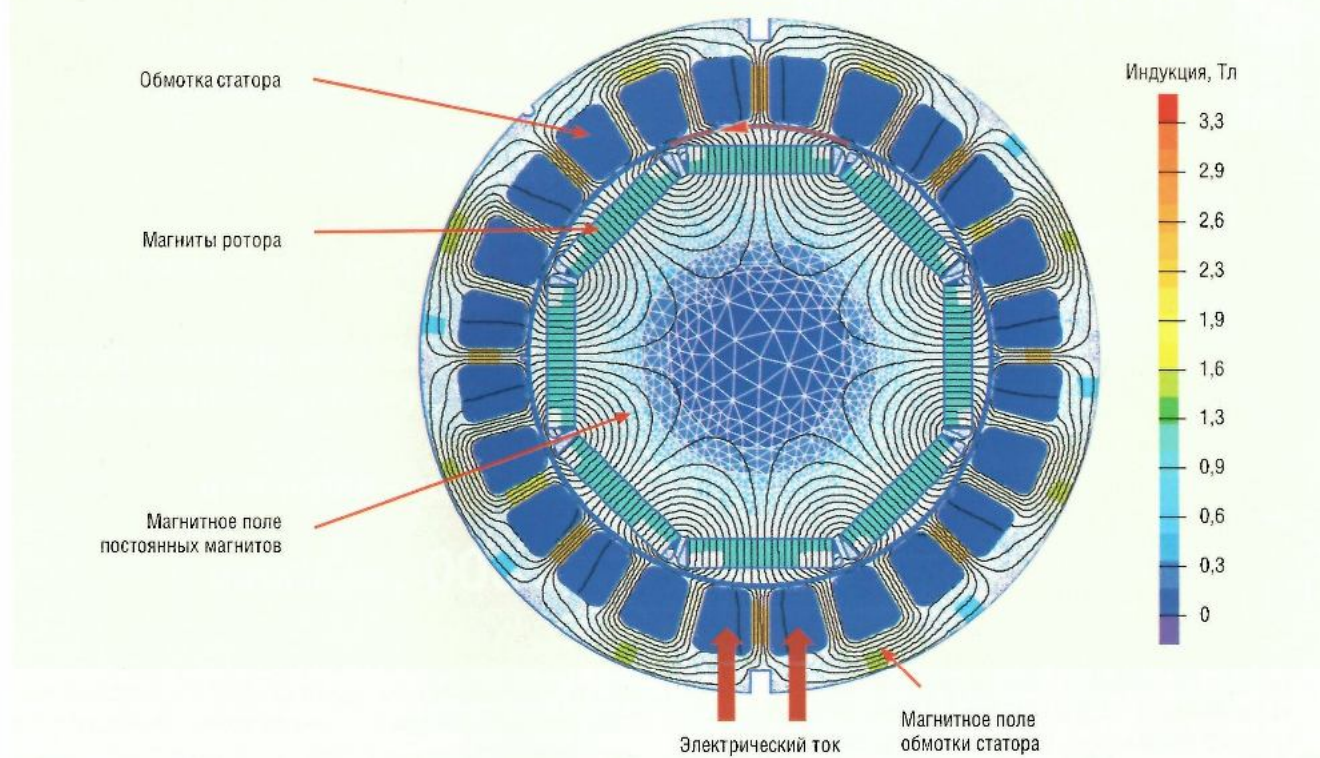


Рис. 2. Отличия магнитной системы ВЭД от асинхронного ПЭД



модействие этих двух полей и приводит ротор в движение (рис. 1).

Применение постоянных магнитов в ВЭД вместо медных стержней, используемых в конструкции асинхронного ПЭД, позволяет не расходовать электроэнергию на создание электродвижущей силы в роторе. За счет того, что напряжение здесь подается только на обмотку статора, ВЭД отличается более высоким КПД и меньшим энергопотреблением по сравнению с асинхронным двигателем такой же мощности. Также конструкция ВЭД предусматривает возможность регулировать частоту вращения двигателя, адаптируя ее под меняющиеся условия эксплуатации нефтяного пласта. Наконец, секция ротора ВЭД короче, чем у асинхронного ПЭД, что позволяет изготавливать двигатели меньших габаритов.

### ПРОИЗВОДСТВО И ВНЕДРЕНИЕ ВЭД

До 2010 года на базе ООО «ЭПУ-ИТЦ» выпускалось не более 320 ВЭД в год, затем объем производства начал расти. В 2015 году руководство ПАО «ЛУКОЙЛ» приняло решение о замене асинхронных ПЭД на ВЭД, что вызвало еще один виток роста их производства (рис. 3).

Также в сентябре 2016 года в г. Когалыме был запущен новый завод по производству ВЭД, и по итогам года было выпущено 1700 ВЭД. Всего на заводе планируется производить до 5000 двигателей в год.

### ОСОБЕННОСТИ Sm-Co МАГНИТОВ

Для использования в ВЭД были выбраны редкоземельные магниты, причем сначала мы применяли сплав неодим-железо-бор (Nd-Fe-B), затем полностью

Рис. 3. Производство и внедрение ВЭД в 2002-2017 гг.



перешли на сплав самарий-кобальт (Sm-Co). Это было связано с тем, что магниты Nd-Fe-B хоть и превосходят Sm-Co по остаточной индукции, коэрцитивной силе и энергоёмкости, но значительно уступают им по коррозионной стойкости и диапазону рабочих температур (табл. 1). Самарий-кобальтовые магниты способны работать при температурах от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+350^{\circ}\text{C}$  и не нуждаются в защитном антикоррозионном покрытии. С переходом на сплав самарий-кобальт отказов электродвигателей, связанных с выходом из строя магнитов не отмечено.

Проблемы, возникающие при использовании самарий-кобальтовых магнитов для производства ВЭД, связаны с технологическими и территориальными аспектами добычи сырья. Магниты Sm-Co относятся к числу редкоземельных, содержание Sm-Co в земной коре не превышает 0,02%, а залежи встречаются в форме нерастворимых в воде тугоплавких оксидов в «рассыпанном» состоянии.

Таблица 1

#### Сравнение свойств постоянных магнитов Nd-Fe-B и Sm-Co

| Магнит  | $B_r, \text{Tл}$ | $H_{cb}, \text{kA/м}$ | $H_{cj}, \text{kA/м}$ | $(BH)_{\text{max}}, \text{кДж/м}^3$ | $T_{\text{раб}}, ^{\circ}\text{C}$                 | Точка Кюри                   |
|---------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------|
| Nd-Fe-B | $1,18 \div 1,25$ | $875 \div 845$        | 2388                  | $263 \div 295$                      | 200                                                | $310 \div 340$               |
| Sm-Co   | $1,10 \div 1,20$ | $811 \div 845$        | 1194                  | $22 \div 240$                       | от $-60^{\circ}\text{C}$ до $+350^{\circ}\text{C}$ | более $+800^{\circ}\text{C}$ |

$B_r$  — остаточная индукция;  $H_{cb}$  — коэрцитивная сила по индукции;  $H_{cj}$  — коэрцитивная сила по намагничённости;  $(BH)_{\text{max}}$  — энергоёмкость магнита

Таблица 2

| Магнитные параметры, предъявляемые к постоянным магнитам китайских производителей |                 |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------|
| Параметры                                                                         | Температура, °C |       |
|                                                                                   | 20              | 150   |
| Остаточная магнитная индукция $B_{r20}$ и $B_{r150}$ , Тл, не менее               | 1,1             | 1,05* |
| Коэрцитивная сила по индукции $H_{cb20}$ и $H_{cb150}$ , кА/м, не менее           | 780             | 570*  |
| Коэрцитивная сила по намагниченности $H_{cj20}$ и $H_{cj150}$ , кА/м, не менее    | 900             | –     |
| Максимальное произведение $(BH)_{max20}$ и $(BH)_{max150}$ , кДж/м³, не менее     | 240             | –     |
| * – справочные параметры                                                          |                 |       |

Почти половина мировых запасов Sm-Co сосредоточена в Китае, Россия находится на втором месте с долей 16,7%. При этом в структуре мировой добычи Китай лидирует с долей 88%, на Россию приходится менее 2% добычи (рис. 4). Несколько лет назад в Китае были введены ограничения по квотам на добычу редкоземельных металлов, что дало толчок началу разработки ранее законсервированных залежей в Австралии, Вьетнаме и США.

Для производства ВЭД ООО «ЭПУ-ИТЦ» требуется более 40 т постоянных магнитов в год, а после выхода завода в г. Когалыме на полную мощность потребность вырастет до 80-90 т. При этом российская промышленность способна предложить лишь 12 т магни-

тов в год, производимых в основном силами ООО «Спецмагнит» и ООО «ПОЗ-Прогресс». В будущем эта ситуация может измениться за счет реализации утвержденной в 2012 году Государственной программы «Технология редких и редкоземельных металлов», главная задача которой заключается в разработке месторождений таких металлов и реализации новых технологий их применения, в том числе в ВПК. В рамках Программы, в частности, планируется восстановление объема добычи лопарита на Левозерском месторождении Кольского полуострова, который с момента распада СССР сократился более чем в 10 раз, а также разработка крупнейшего в мире Томторского месторождения редкоземельных руд, расположенного в Се-

Рис. 4. Структура мировых запасов и добычи Sm-Co магнитов

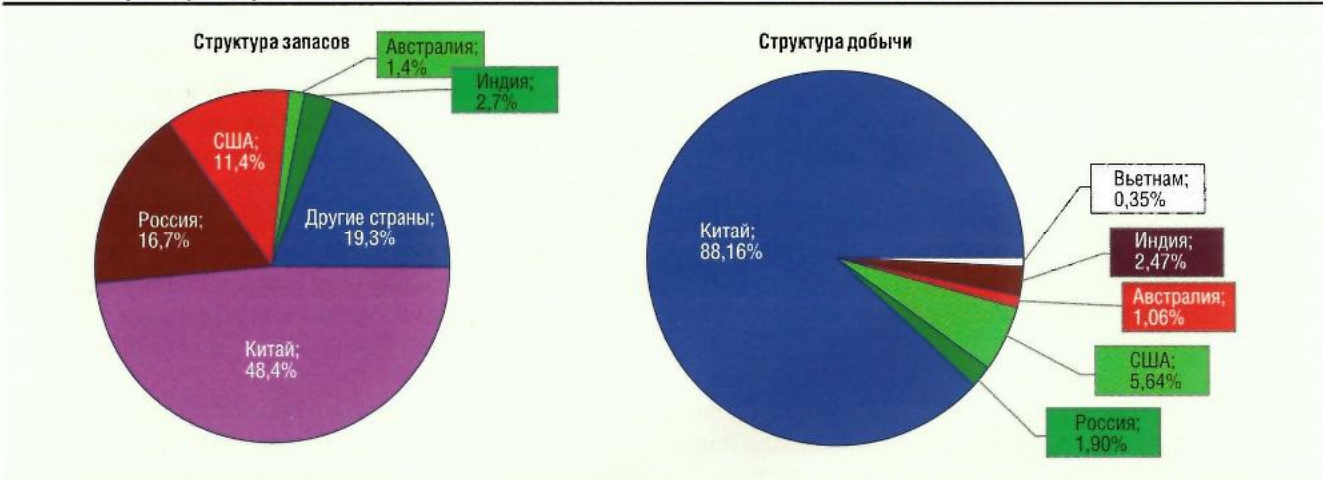


Рис. 5. Оборудование лаборатории магнитных измерений в ООО «ЭПУ-ИТЦ»



Таблица 3

| Технические и температурные требования, предъявляемые к постоянным магнитам китайских производителей                                                             |                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Технические параметры                                                                                                                                            |                                                       |
| Материал $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$                                                                                                                             | Должен соответствовать марке КС25ДЦ-240 по ГОСТ 21559 |
| Плотность материала магнита, $\text{г/см}^3$                                                                                                                     | 8,2-8,6                                               |
| Температурные параметры                                                                                                                                          |                                                       |
| Температурный коэффициент обратимых измерений магнитной индукции в интервале температур (ОТКИ $\text{Br}_{20-150}$ ) 20-150°C, %, не более                       | 0,035                                                 |
| Температурный коэффициент обратимых измерений коэрцитивной силы по магнитной индукции в интервале температур (ОТКИ $\text{Hcb}_{20-150}$ ) 20-150°C, %, не более | 0,07                                                  |
| Температурный коэффициент обратимых измерений коэрцитивной силы по намагниченности в интервале температур (ОТКИ $\text{Hcj}_{20-150}$ ) 20-150°C, %, не более    | 0,2                                                   |
| Максимальная рабочая температура, °C                                                                                                                             | 300                                                   |

верной Якутии, с созданием необходимой сопутствующей инфраструктуры.

#### РАБОТА С КИТАЙСКИМИ ПОСТАВЩИКАМИ

В настоящее время недостаток предложения постоянных магнитов на внутреннем рынке обуславливает необходимость их импорта из Китая. На начальном этапе организации поставок часто возникали проблемы с качеством китайских магнитов, связанные с разными методиками их проверки. Поэтому руководство ООО «ЭПУ-ИТЦ» приняло решение тщательно изучить китайский рынок, установить контакты с китайскими предприятиями и наладить собственный входной контроль качества магнитов.

Мы посетили семь китайских предприятий по производству постоянных магнитов, различных по технологии и масштабам производства, выработали жесткие требования к магнитам для ВЭД и ознакомили с ними представителей китайских предприятий (табл. 2, 3). Также мы создали уникальную лабораторию магнитных измерений, предназначенную для входного контроля параметров поставляемых магнитов. В частности, оснащение лаборатории гистерезисграфом позволяет измерять поверхностную индукцию, регистрировать кривую размагничивания, а с помощью магнетайзера появилась возможность восстанавливать характери-

#### ВЫДЕРЖКИ ИЗ ОБСУЖДЕНИЯ

**Вопрос:** Александр Андреевич, Вы отметили, что ВЭД потребляет на 15-20% меньше электроэнергии по сравнению с асинхронным ПЭД. Эта цифра расчетная или она подтверждена замерами в скважинах?

**Александр Катаев:** Эта цифра и расчетная, и подтвержденная практическими данными.

**Вопрос:** Как проводятся стендовые испытания технологических секций ВЭД – с нагрузкой или вхолостую?

**А.К.:** Секции испытываются без нагрузки, на скорости вращения 1000 об./мин.

**Вопрос:** Какова максимальная и минимальная мощность ВЭД 117-го габарита?

**А.К.:** Она составляет 150 и 20 кВт соответственно.

стики магнитов после размагничивания (рис. 5). Кроме того, создан специальный стенд, на котором проводятся испытания технологических секций ВЭД с постоянными магнитами, что позволяет гарантировать будущим потребителям качество их работы (табл. 4).

В результате проведенных мероприятий нам удалось добиться высокого качества поставляемых из Китая магнитов и наладить их бесперебойные поставки, а значит – повысить энергоэффективность и надежность работы ВЭД производства ООО «ЭПУ-ИТЦ». ♦

Таблица 4

| Методы контроля магнитов в лаборатории ООО «ЭПУ-ИТЦ»                                              |                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Контролируемая характеристика                                                                     | Метод контроля              |
| Измерение поверхностной индукции                                                                  | Тесламетр Маяк-2М           |
| Измерение потокоцепления с катушкой Гельмгольца                                                   | Веберметр PF 900-1          |
| Снятие характеристик кривой размагничивания при комнатной температуре и при $T=150^\circ\text{C}$ | Гистерезисграф АМТ-4        |
| Восстановление свойств магнитов после снятия характеристик кривой размагничивания                 | Магнетайзер                 |
| Измерение ЭДС технологической секции, собранной с испытываемыми магнитами                         | Стенд контроля секций СКС-2 |