

Исследование режимов функционирования нефтяных скважин с применением кластерного анализа

И. С. Лузянин¹, А. Г. Пахаруков², Ю.В. Калоша³

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

¹lis@msa.pstu.ru, ²pag@msa.pstu.ru, ³kuv@msa.pstu.ru

А. В. Ляхомский

Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»
mggu.eegp@mail.ru

Аннотация. Современные предприятия нефтедобывающей отрасли вынуждены снижать электропотребление оборудования нефтяных месторождений при постоянном росте объемов добычи углеводородного сырья. Для этого необходимы более точные расчетные модели, применяемые для подбора оборудования скважин и управления режимами их функционирования. Математические модели нефтяных скважин основаны на дифференциальных уравнениях, решение которых представляет собой трудоемкую задачу. Возможным способом повышения точности расчетных моделей является их дополнение статистическими зависимостями, учитывающими индивидуальные особенности функционирования скважин. Для определения этих зависимостей в статье исследуется взаимное влияние электрических, механических и технологических параметров нефтяных скважин. Производится оценка значимости их эксплуатационных характеристик. На основе данных кластеризации в работе выявляются типовые режимы функционирования. Результаты исследования позволяют производить классификацию режимов работы скважин и прогнозирование изменений их параметров в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: нефтяная скважина; оценка значимости; кластерный анализ; статистический анализ данных; режимы функционирования нефтяных скважин

I. ВВЕДЕНИЕ

В условиях повышенного спроса на углеводородное сырье основной задачей нефтедобывающих предприятий (НДП) является обеспечение стабильно высоких объемов добычи. Решение этой задачи связано с определенными проблемами (осложняющие факторы, снижение нефтеотдачи пласта, особенности притока нефти в скважину и др.), устранение которых требует повышения затрат электроэнергии, что приводит к удорожанию добычи и снижению ее рентабельности. Анализ данных реальных месторождений показал, что системы механизированной добычи нефти потребляют значительный объем электроэнергии, а их оптимизация с точки зрения энергетической эффективности является наиболее сложной задачей. Электропотребление объектов механизированной добычи обычно не рассматривается как

критерий оптимизации, а его снижение часто приводит к возникновению неэффективных режимов работы скважин.

Несмотря на описанные проблемы, предприятия нефтедобывающей отрасли заинтересованы в снижении электропотребления систем механизированной добычи, так как это позволяет выполнить требования правительства в области энергосбережения и повысить рентабельность добычи.

Специфика функционирования нефтедобывающей скважины не позволяет постоянно проводить мероприятия по замене оборудования при частом изменении ее параметров [1, 2]. Кроме того, при вводе скважины в эксплуатацию, ее характеристики определяются приближенно, что не позволяет точно оценить параметры электропотребления на начальной стадии эксплуатации. В этих условиях возможным способом уточнения энергетических параметров скважины является статистический анализ зависимостей электропотребления от набора неэлектрических параметров, доступных для точного измерения на стадии проектирования скважины.

Целью исследования является определение минимального набора параметров, позволяющих с достаточной точностью определить ожидаемое электропотребление двигателя насоса, а также его энергетическую эффективность. В качестве критерия оценки энергетической эффективности добывающей скважины в работе рассматривается удельное электропотребление скважины на единицу извлекаемой пластовой жидкости. В статье представлены результаты оценки значимости неэлектрических параметров при прогнозировании электропотребления погружного электродвигателя (ПЭД) и удельного электропотребления скважины. Также в статье представлены результаты кластерного анализа на основе метода k -средних, проведенного с целью выявления типовых электрических режимов в зависимости от неэлектрических параметров. Данный метод широко распространен при анализе электропотребления жилых массивов [3–5].

II. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ

Нефтяное месторождение включает три взаимодействующие системы: геологическую, механическую и электрическую. Геологическая система

(ГС) представляет собой нефтяной пласт и характеризуется свойствами вмещающего коллектора и параметрами пластовой жидкости. Механическая система (МС) включает центробежный насос, газосепаратор, гидрозашиту, колонну насосно-компрессорных труб, устьевую арматуру и собирающий коллектор. Данная система характеризуется гидравлическими параметрами трубопровода и механическими параметрами насосного агрегата. Электрическая система (ЭС) включает станцию управления, повышающий трансформатор, погружной кабель и ПЭД.

Каждая из представленных систем характеризуется собственным набором параметров, которые оказывают влияние на процесс нефтедобычи, который регулируется технологическим режимом работы скважины. Технологический режим, в свою очередь, также определяется собственным набором параметров.

В таблице представлены основные параметры, характеризующие работу нефтяной скважины, которые использовались для статистического анализа.

ТАБЛИЦА 1 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ

Наименование параметра	Обозначение
Пластовое / забойное давление, атм.	$p_{пл} / p_{заб}$
Линейное / буферное давление, атм.	$p_{лин} / p_{буф}$
Статическое / динамическое затрубное давление, атм.	$p_{з.ст} / p_{з.дин}$
Статический / динамический уровень, м	$h_{ст} / h_{дин}$
Фактический расход жидкости / нефти, м ³ /сут. / т/сут.	$q_{ж.ф.} / q_{н.ф.}$
Фактическая обводненность, %	$w_{\%}$
Фактическая плотность воды / нефти, г/см ³	$\rho_{в} / \rho_{н}$
Производительность ЭЦН, м ³ /ч	q_n
Глубина спуска ЭЦН, м	H
Скорость вращения ЭЦН, об./мин	n
Коэффициент подачи насоса	$K_{под}$
Идеальная подача насоса, м ³ /ч	q_0
КПД двигателя / насоса, %	$\eta_{дв} / \eta_n$
Полезная / полная механическая мощность насоса, кВт	$P_{н.п} / P_{н.полн}$
Мощность ПЭД/ УЭЦН	$P_{пэд} / P_{эцн}$
Удельное электропотребление, кВт*ч/м ³	$W_{уд}$
Потери активной мощности в погружном кабеле, кВт	$\Delta P_{кл}$

В таблице первые две строки содержат технологические параметры и характеристики пластовой жидкости, третья и четвертая строки содержат механические и электрические параметры соответственно.

В исследовании рассматриваются скважины, оборудованные установками электроцентробежных насосов (УЭЦН) с асинхронными ПЭД. Установки данного типа широко распространены на месторождениях с различными условиями эксплуатации, что обусловлено их высокой производительностью в широком диапазоне глубин. При этом асинхронные ПЭД обычно дешевле по сравнению с другими типами двигателей, но отличаются большим электропотреблением.

Поскольку основной объем электропотребления обеспечивается ПЭД и погружным кабелем, другое оборудование ЭС скважины в работе не рассматривается. Функционирование ЭС определяется электрическим режимом, параметрами которого являются токи в ветвях и напряжения в узлах электрической сети. Электрический и технологический режимы совместно определяют энергетическую эффективность скважины. Ниже приводится аналитическое описание взаимосвязей между параметрами режимов (представленными в таблице), которое позволяет определить общие закономерности между данными перед началом статистического анализа.

Характеристика притока жидкости в скважину, определяемая по формуле 1, имеет ключевое значение для определения технологического режима [6]:

$$q = K_{прод} (p_{пл} - p_{заб}) \quad (1)$$

где $K_{прод}$ – коэффициент продуктивности скважины, учитывающий параметры ГС. Приведенное уравнение устанавливает связь между объемом жидкости, извлекаемым из скважины, и разностью пластового и забойного давлений, называемой депрессией пласта. В работе предполагается, что величина $K_{прод}$ для отдельной скважины не изменяется, что исключает влияние ГС на технологический режим.

Другим важным технологическим параметром является динамический уровень (формула 2). Эта характеристика определяет высоту подъема жидкости, достаточную для ее перелива через устье скважины и дальнейшей транспортировки в собирающем коллекторе.

$$h = \frac{2.31 \cdot p}{\gamma_{ж}}, \quad (2)$$

где $\gamma_{ж}$ – удельный вес жидкости. При механизированной добыче объем жидкости и высота ее подъема определяются скоростью вращения вала насоса [7] (формулы 3,4)

$$q_2 = q_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (3)$$

$$h_2 = h_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (4)$$

Скорость вращения вала, в свою очередь, определяет электропотребление ПЭД (формула 5).

$$P_{пэд} = M \cdot \omega \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_n, \quad (5)$$

где M – момент двигателя; $\eta_{дв}$, η_n – КПД двигателя и насоса соответственно. Приведенные уравнения позволяют установить взаимосвязь между ключевыми параметрами технологического и электрического режимов. В действительности их не достаточно для полного описания скважины, однако в данной работе они используются только для определения общих закономерностей, необходимых для лучшего понимания значимости данных при прогнозировании значения электропотребления.

III. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

Целью статистического анализа данных является определение типовых режимов функционирования нефтяных скважин с учетом как технологических, так и электрических параметров. Для достижения поставленной цели была сформирована выборка данных по 330 скважинам, расположенным в 6 различных цехах, работающим в непрерывном режиме в различных условиях эксплуатации и находящимся на различных стадиях жизненного цикла. Для каждой скважины получен вектор из 31 параметра (таблица).

С целью сокращения размерности исходных данных был проведена оценка значимости параметров при прогнозировании значений активной электрической мощности, потребляемой ПЭД ($P_{пэд}$) и удельного электропотребления скважины ($W_{уд}$). Для этого был проведен регрессионный анализ данных, в рамках которого осуществлялся поиск минимальной комбинации неэлектрических параметров, дающих максимальное количество корректных определений $P_{пэд}$ и $W_{уд}$.

Максимальный объем корректно объясняемых значений $P_{пэд}$ составил 91% ($R^2 = 0,914$, скорректированный $R^2 = 0,912$) при использовании трех неэлектрических параметров (динамический уровень, фактический напор жидкости, глубина спуска насоса) и одного электрического (удельные потери в кабельной линии). При исключении удельных потерь в кабельной линии объем корректно определяемых значений снижается до 71% ($R^2 = 0,7193$, скорректированный $R^2 = 0,7167$). При этом уровень значимости данных параметров наибольший (максимальное значение $p\text{-value} < 2,2 \cdot 10^{-16}$).

Максимальный объем корректно объясняемых значений $W_{уд}$ составил 71% ($R^2 = 0,7139$, скорректированный $R^2 = 0,7049$) при использовании восьми неэлектрических параметров (динамический уровень, фактический напор жидкости, фактический напор нефти, фактическая обводненность, номинальная производительность насоса, глубина спуска насоса, коэффициент подачи насоса, оптимальная подача насоса) и одного электрического (удельные потери в кабельной линии). При исключении удельных потерь в кабельной линии объем корректно определяемых значений снижается до 68% ($R^2 = 0,6804$, скорректированный $R^2 = 0,6713$). При этом уровень значимости данных параметров наибольший (максимальное значение $p\text{-value} = 2,6 \cdot 10^{-4}$).

Таким образом, величина удельного электропотребления скважины зависит от большего числа неэлектрических параметров, чем величина потребляемой двигателем мощности. При этом, влияние потерь активной мощности в кабельной линии на электропотребление ПЭД выше, чем на удельное электропотребление скважины.

Полученные сокращенные выборки были использованы для кластеризации методом k -средних. Оптимальное число кластерных центров для электропотребления ПЭД составило 3. Результаты кластеризации представлены на рисунке.

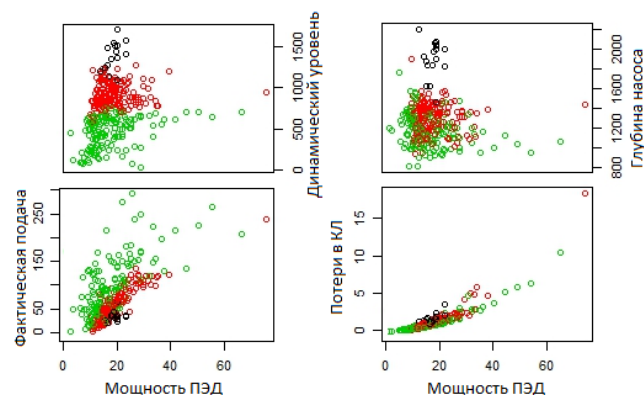


Рис. 1. Результаты кластеризации данных для определения типовых режимов электропотребления ПЭД

Рисунок иллюстрирует возможность выделения трех различных режимов электропотребления, однако расстояние между кластерами незначительное, что свидетельствует о слабой выраженности различий между ними. Оптимальное число кластерных центров для удельного электропотребления составило 4, результаты кластеризации демонстрируют те же закономерности, что и в случае с электропотреблением.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты регрессионного анализа позволяют существенно сократить размерность исходных данных, однако полученная модель нуждается в проверке адекватности. Результаты исследования будут использованы для планирования эксперимента на реальном оборудовании, целью которого будет получение репрезентативной выборки, содержащей достоверные сведения о параметрах электропотребления, наблюдаемых в конкретных технологических режимах. Полученная выборка позволит проверить адекватность модели.

Кластерный анализ данных позволил выделить три различных режима функционирования скважин с позиции электропотребления ПЭД и четыре различных режима с позиции удельного электропотребления, однако разброс данных внутри кластеров достаточно велик при сравнительно малом расстоянии между кластерными центрами, что говорит о невозможности уверенного различения границ режимов. Это может означать отсутствие четких различий между режимами функционирования различных месторождений. Однако

данная проблема может также свидетельствовать о нерепрезентативности исходной либо о неправильно выбранном методе кластеризации. В дальнейшем исходная выборка будет уточняться и дополняться данными, которые позволят проверить адекватность применяемого метода и более точно определить статистические свойства исходной выборки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Стандарт ОАО «ЛУКОЙЛ» СТП-01-026-2003: Система технического обслуживания, контроля технического состояния и ремонта по техническому состоянию нефтепромыслового оборудования дочерних нефтегазодобывающих обществ ОАО «ЛУКОЙЛ», Пермь, 2003.
- [2] РД 34.45-51.300-97: Объем и нормы испытаний электрооборудования, Москва: Издательство НИЦ ЭНАС, 2004.
- [3] Al-Wakeel A., Wu J., K-means Based Cluster Analysis of Residential Smart Meter Measurements // *Energy Procedia*. 2016. vol. 88. pp. 754-760. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.066.
- [4] Liu G., Yang J., Hao Y., Zhang Y., Big data-informed energy efficiency assessment of China industry sectors based on K-means clustering. *Journal of Cleaner Production*. 2018. vol. 183. pp. 304-314. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.129.
- [5] Deb C., Lee S. E., Determining key variables influencing energy consumption in office buildings through cluster analysis of pre- and post-retrofit building data, *Energy and Buildings*. 2018. vol. 159. pp. 228-245. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.11.007.
- [6] Takacs G., *Electrical submersible pump manual: design, operations, and maintenance*, Gulf Professional Publishing, 2009, 420 p.
- [7] Gülich J. F., *Centrifugal pumps*, 2nd Edition, Springer, 2010, 998 p.
- [8] Petrochenkov A. B. Regarding Life-Cycle Management of Electrotechnical Complexes in Oil Production // *Russian Electrical Engineering*. 2012. vol. 83. No.11. pp.621-627. DOI: 10.3103/S1068371212110090.
- [9] Utkin L.V., Zhuk Y.A., Selikhovkin I.A., A classification model based on incomplete information on features in the form of their average values // *Scientific and technical information processing*, 2012. vol. 39(6). pp. 336-344. DOI: 10.3103/S0147688212060068.
- [10] Alekseev V. V., Emel'yanov A. P., Kozyaruk A. E., Analysis of the dynamic performance of a variable-frequency induction motor drive using various control structures and algorithms // *Russian Electrical Engineering*. 2016. vol. 87. no. 4. pp. 181-188. DOI: 10.3103/S1068371216040027.
- [11] Hailong L., The numerical simulation for multistage fractured horizontal well in low-permeability reservoirs based on modified Darcy's equation // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2017. vol. 7(3). pp. 735-746. DOI:10.1007/s13202-016-0283-1.