

УДК 621.6: 622.276.53

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ И ДИАГНОСТИКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН, ОБОРУДОВАННЫХ УСТАНОВКАМИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ (УЭЦН), МЕТОДОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПОТЕРЬ

Большунов А.В., Мостакалов К.А.

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск,
e-mail: artembolschunov@yandex.ru*

Статья посвящена концепции возврата инвестиций (EROI), которая применяется к установкам погружных электроцентробежных насосов (УЭЦН), установленных на нефтяном месторождении Западной Сибири, путем подробного учета энергии каждой УЭЦН. Эта информация используется авторами для количественной оценки потерь энергии и эффективности каждой системы УЭЦН, а также EROI процесса подъема (EROILifting), которая получается путем деления энергии из каждой скважины, которая является химической энергией добываемой сырой нефти, на энергию, потребляемую каждой системой УЭЦН и поверхностным оборудованием, используемым для утилизации добываемой воды из скважины. Результирующие значения EROILifting варьируются от 93 до 565 с соответствующим диапазоном энергоемкости от 18,3 до 3,0 кВт-ч / баррель нефти. Затраты на подъем целиком состоят из закупаемого дизельного топлива. Энергия, потребляемая каждой скважиной, также используется для расчета затрат на подъем, то есть дополнительных затрат на добычу дополнительного барреля сырой нефти, которые варьируются от 0,64 до 3,90 долларов США / баррель нефти. Электрический КПД варьируется от 0,60 до 0,80, а гидравлические КПД варьируются от 0,12 до 0,56. Общие КПД УЭЦН варьируются от 0,09 до 0,39, причем самые большие потери происходят в гидравлической системе, особенно в самом насосе УЭЦН. Увеличение эффективности насоса возможно путем регулировки скорости насоса, но данный процесс может и улучшить энергоемкость, затраты на подъем и EROI. Тщательный анализ изменения скорости насоса требует переоценки энергии на входе, энергии на выходе и связанной с этим энергоемкости и затрат на подъем.

Ключевые слова: установка погружного электроцентробежного насоса, расчет энергетических потребностей, EROI, энергоемкость, подъемная энергия

DEVELOPMENT OF SYSTEM FOR ASSESSMENT AND DIAGNOSTICS OF OPERABILITY OF OIL WELLS EQUIPPED WITH INSTALLATIONS OF ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMPS BY METHOD OF ENERGY EFFICIENCY AND LOSSES

Bolshunov A.V., Mostakalov K.A.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: artembolschunov@yandex.ru

The article is devoted to the concept of return on investment (EROI), which is used to install deep-sea electric centrifugal pumps (ESP) open to oil fields in Western Siberia, using detailed energy metering of each ESP. This information is used by the authors to quantify the energy losses and efficiency of each ESP system, as well as the EROI lifting process (EROILifting), which is the result of equipment used to recover produced water from the well. The resulting EROILifting values range from 93 to 565, taking into account energy intensity ranges from 18.3 to 3.0 kWh / barrel of oil. Rising costs consist entirely of purchased diesel fuel. Oil and gas production costs range from \$ 0.64 to \$ 3.90 / barrel. Electrical efficiency ranges from 0.60 to 0.80, and hydraulic efficiency ranges from 0.12 to 0.56. The overall efficiency of the ESP varies from 0.09 to 0.39, with the largest losses occurring in the hydraulic system, especially in the ESP pump itself. Pump efficiency can be improved by adjusting the pump speed, but it may or may not improve energy intensity, lift costs and EROI. A thorough analysis of changes in pump speed requires reevaluation of the input energy.

Keywords: submersible electric centrifugal pump installation, energy accounting, EROI, energy intensity, lifting energy

Поиски новых нефтяных месторождений привели к тому, что нефтегазовые компании начали разрабатывать менее выгодные месторождения. Разработка и эксплуатация таких нефтяных месторождений, как правило, являются энергоемкими из-за удаленной среды, в которой они работают [1, с. 251]. С точки зрения логистики энергия требуется для транспортировки ресурсов на объекты для поддержки бурения, эксплуатации и технического обслуживания. Энергия также необходима для хранения и транспортировки сырой нефти на рынок. Наконец, с точки зрения жиз-

ненного цикла требуется значительное количество энергии для поднятия пластовых флюидов к поверхностным сооружениям и для закачки отделенной воды обратно в пласт.

Целью данного исследования является предоставление понимания последней категории путем разработки и анализа соответствующих показателей энергоэффективности, таких как возврат инвестиций в энергию (EROI) и энергоемкость (EI), а также для понимания того, как производные энергетические показатели относятся к эксплуатационным расходам.

Материалы и методы исследования

В данной работе проанализированы данные по нескольким нефтяным месторождениям, расположенным в Западной Сибири. Для анализа выбрана репрезентативная группа, данные оцениваются с 2017 г. В выбранной группе 18 эксплуатационных скважин, которые представляют широкий диапазон рабочих условий, таких как глубина скважины, свойства флюида, дебиты нефти и воды и забойные давления. Методология включает в себя обработку каждого производства, а также отдельный центр учета энергии для облегчения сравнения между скважинами и оценки факторов, которые влияют на связанные с энергией параметры, такие как EROI и EI, и экономические факторы, такие как затраты на подъем. Следует отметить, что есть также три водозаборные скважины, которые получают воду под давлением от центробежных насосов, расположенных на месторождении. Исследование опиралось на схожий метод исследования в статье [2, с. 319].

Методология данного исследования включает в себя следующие этапы:

- Шаг 1: Разработка EROILifting и EI для каждой скважины.
- Шаг 2: Разработка затрат на подъем для каждой скважины.
- Шаг 3: Разработка подробных энергетических балансов для каждой скважины.
- Шаг 4: Анализ.

1. Шаг 1: Разработка EROI-Lifting и энергоёмкости для каждой скважины.

Общий EROI_{Lifting} для каждой скважины может быть рассчитан:

$$EROI_{Lifting} = \left(\frac{E_{Lifting-out}}{E_{Lifting-in}} \right), \quad (1)$$

где EROI_{Lifting} – рентабельность инвестиций;

E_{Lifting-out} – подъем энергии;

E_{Lifting-in} – сырая химическая энергия.

2. Шаг 2: Разработка затрат на подъем для каждой скважины.

Расходы на подъем были рассчитаны путем преобразования ежедневного потребления дизельного топлива в стоимость. Следовательно, стоимость подъема для каждой скважины может быть получена путем умножения энергоёмкости на затраты энергии, как описано в уравнении

$$LC = EI_{Lifting} * E_{cost}, \quad (2)$$

где LC – стоимость подъема;

EI_{Lifting} – энергоёмкость;

E_{cost} – затраты энергии.

3. Шаг 3: Разработка подробных энергетических балансов для каждой скважины.

Данный шаг включает анализ УЭЦН с реально нефтяного месторождения, чтобы лучше понять энергетическое поведение систем УЭЦН в реальной операционной среде. Был выбран типичный день, данные были извлечены с места через распределенную систему управления, приводы с регулируемой скоростью и распределительные устройства трансформаторов.

Ряд уравнений используется для расчета баланса энергии для каждой из 18 УЭЦН.

1. Общий электрический баланс для каждой скважины:

$$E_e^{in} - E_e^{surface\ loss} - E_e^{cable\ loss} - E_e^{esp\ motor\ loss} = WHP(0,746), \quad (3)$$

где E_eⁱⁿ – потребляемая мощность;

E_e^{surface loss} – потеря электроэнергии в наземном оборудовании;

E_e^{cable loss} – потеря электроэнергии в кабелях;

E_e^{esp motor loss} – электрические потери от двигателя УЭЦН;

WHP – мощность вала, обеспечиваемая двигателем.

Потери мощности на поверхности рассчитываются с учетом коэффициента мощности наземного оборудования:

$$E_e^{surface} = E_e^{in} * (1 - \eta^{surface}), \quad (4)$$

где E_e^{surface} – потери электроэнергии в наземном оборудовании;

η^{surface} – коэффициент мощности наземного оборудования (принимается равным 0,95).

Потери кабеля в скважине зависят от сопротивления кабеля и тока:

$$E_e^{cable} = \frac{3I^2 R_T}{1000}, \quad (5)$$

где E_e^{cable} – потеря электроэнергии в кабелях;

I – необходимый ток двигателя;

R_T – сопротивление силового кабеля при температуре скважины.

Потери двигателя рассчитываются путем умножения электрической мощности в двигателе на коэффициент эффективности двигателя УЭЦН, который извлекается из кривой эффективности двигателя:

$$E_e^{esp\ motor\ loss} = E_e^{esp\ motor\ in} * (1 - \eta^{esp\ motor}), \quad (6)$$

где E_e^{esp motor in} – потеря электрической мощности в двигателе УЭЦН;

η^{sp motor} – КПД двигателя УЭЦН (получен из кривых эффективности двигателя производителей).

Общий КПД электрической мощности для каждой скважины – это просто выходная мощность тормоза двигателя, деленная на мощность в электрической системе УЭЦН:

$$\eta^{electrical} = \frac{WHP}{E_e^{in}}, \quad (7)$$

где η^{electrical} – энергоэффективность для каждой скважины;

Общий баланс гидравлической энергии для каждой скважины описывается уравнением

$$WHP = (E_h^{uplifting} + E_h^{bp} + E_h^{fr} + E_h^{esp\ pump\ loss}) / 0,746, \quad (8)$$

где E_h^{uplifting} – гидравлическая грузоподъемность.

E_h^{bp} – потеря гидравлической мощности из-за протирания поверхности;

E_h^{fr} – потеря гидравлической мощности из-за трения в насосно-компрессорных трубах;

E_h^{esp pump loss} – потеря гидравлической мощности в насосе УЭЦН.

Гидравлическая подъемная сила насоса УЭЦН [3]:

$$E_h^{uplifting} + E_h^{bp} = \frac{(Qpgh)}{3,6*10^6} * 0,746, \quad (9)$$

Q – расход;
 p – плотность жидкости;
 g – гравитационная постоянная;
 h – общий развиваемый напор.

Результаты исследования и их обсуждение

За проанализированный день общая потребляемая группой скважин мощность, совпадающая с ежедневными собранными данными УЭЦН, составила 1536 кВт. Крупнейшим потребителем мощности являются УЭЦН, которые потребляют 1034 кВт, затем насосы закачки воды, которые потребляют 451 кВт, с различными коммунальными услугами потребляют оставшиеся 51 кВт. Нагнетательные насосы закачивают воду в установленные резервуары низкого давления, на производительность водяных нагнетательных насосов влияют давление впрыска и расход, которые являются относительно стабильными. Условия УЭЦН существенно различаются от скважины к скважине и зависят от большого количества параметров, таких как условия притока, абсолютная глубина скважины (TVD), глубина по стволу (MD), общая скорость жидкости, расход нефти, воды и газа, перепад давления по насосам, количество установленных ступеней и конструкция ступеней. Кроме того, УЭЦН динамичны, а условия на входе постоянно меняются из-за сложных переходных процессов в коллекторе.

Таким образом, из 18 исследованных скважин нет даже двух с одинаковыми ра-

бочими условиями. Это предположение подтверждается при проверке EROI и интенсивности энергии каждого из 18 УЭЦН, что показано на рис. 1. Как и ожидалось, $EROI_{Lifting}$ и энергоёмкость находятся в обратной зависимости. Значения $EROI_{Lifting}$ варьируются от 93 до 565, а широкий диапазон объясняется сильно изменяющимися условиями, которым подвержены УЭЦН. Самый низкий показатель $EROI_{Lifting}$, равный 93, указывает на то, что даже самая неэффективная УЭЦН обеспечивает возврат энергии, который почти на два порядка выше затраченной энергии.

Чтобы лучше понять изменчивость, наблюдаемую в вычисленных УЭЦН и интенсивностях энергии, был проведен подробный учет энергии для каждой из 18 УЭЦН [4]. Рассмотрим в качестве примера баланс энергии для УЭЦН – 06. В этом примере мощность, предоставляемая системе УЭЦН, составляет 72,0 кВт, что эквивалентно 96,6 л.с. Тормозная мощность, обеспечиваемая двигателем, составляет 76,8 л.с., поэтому электрический КПД эквивалентен 0,80. Требуемый гидравлический напор составляет 29,0 л.с., а гидравлический КПД равен гидравлическому напору, деленному на мощность в тормозной системе, подаваемой на насос, что дает гидравлический КПД 0,38. Общая эффективность для этого УЭЦН составляет 0,30. Эффективности для всех 18 систем УЭЦН показаны на рис. 2. Электрические КПД варьировались от 0,60 до 0,80, а гидравлические КПД варьировались от 0,12 до 0,56. Это приводит к диапазону общей эффективности от 0,09 до 0,39. Очевидно, что гидравлическая эффективность непропорционально способствует общей эффективности.

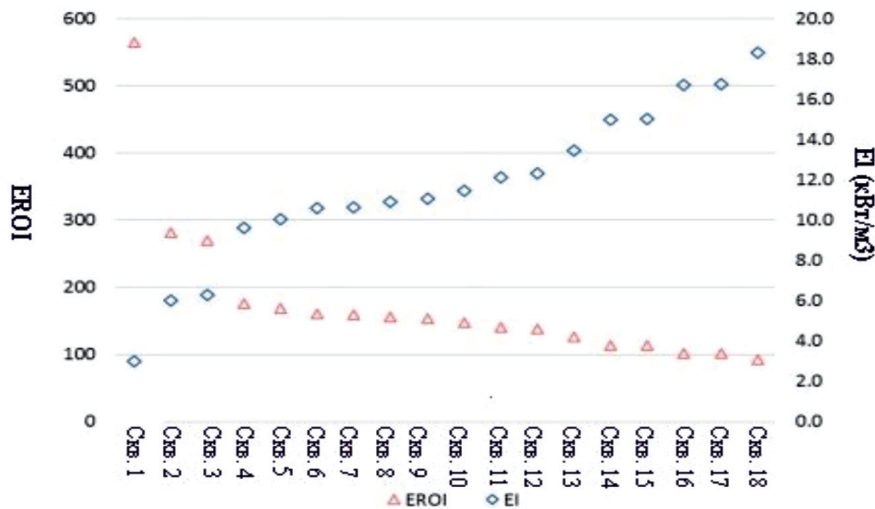


Рис. 1. EROI-лифтинг и энергоёмкость для 18 УЭЦН

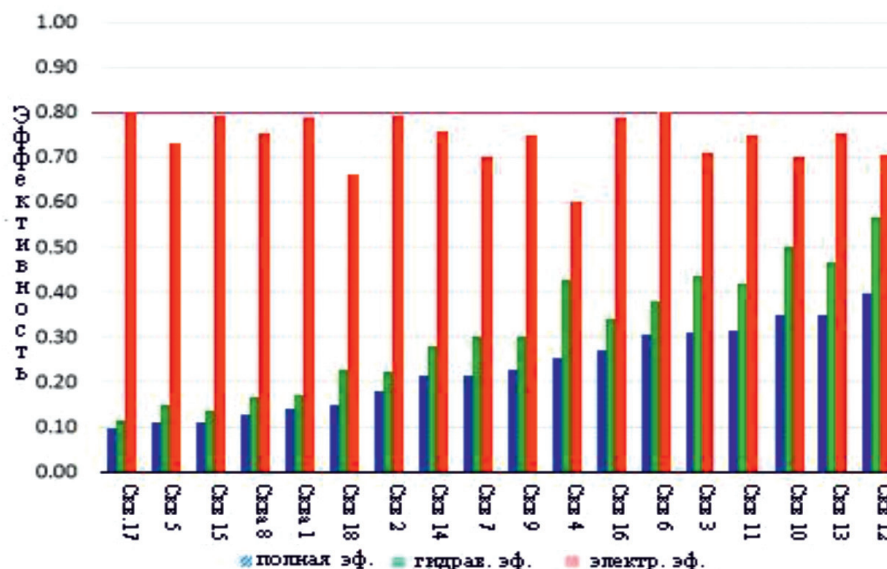


Рис. 2. Гидравлическая, электрическая и общая эффективность УЭЦН

Заклучение

В данном исследовании рассматриваются энергетические и стоимостные характеристики отдельных скважин, оснащенных УЭЦН. Что касается возврата энергии, то она значительно расширяет методологию EROI от ее типичного применения на глобальном, региональном и местном уровнях. Искусственный подъем является по своей сути энергоемким процессом, и как таковой имеет смысл понимать чистую энергию, полученную из каждой скважины, как описано параметром EROI [5, с. 439].

На более практическом уровне энергоемкость каждой скважины является важным соображением для операторов, сталкивающихся с ограничениями, связанными с оборудованием, такими как:

- в отношении использования энергии и жидкостей;
- развитие подъемных затрат для каждой скважины дает операторам очевидную ценность с точки зрения приоритизации скважин и углубления понимания экономики добычи;
- в совокупности параметры энергоемкости и подъемных затрат обеспечивают операторов нефти и газа критической информацией, которая может использоваться для поддержки принятия решений на уровне отдельных скважин;
- решения о скорости работы насосов и о приоритетности скважин в условиях эксплуатационных ограничений, таких как затраты на топливо, выработку электроэнергии и мощности технологического оборудования.

Основным ограничением этого подхода является то, что возврат энергии или анализ полезной энергии, как описано параметром EROI, для отдельных скважин может считаться практически невыполнимой информацией для операторов нефтяных и газовых месторождений. EROI отдельных скважин рассчитываются только с учетом применяемой энергии топлива, и это обычно приводит к очень высоким значениям EROI по сравнению с более всесторонним анализом жизненного цикла на уровне поля, который учитывает все применяемые энергии, такие как энергия бурения, энергия строительства и т.д. Таким образом, высокие EROI, рассчитанные в этом исследовании, могут предоставить операторам вводную в заблуждение и чрезмерно оптимистичную информацию. И наоборот, методология EROI преднамеренно игнорирует выходные энергии по отношению к связанным продуктам, таким как пластовая вода, газ и твердые вещества. Это может привести к мысли, что процесс подъема менее эффективен, чем на самом деле.

В то время как анализ, содержащийся в этом документе, касается только скважин, оборудованных УЭЦН, логическим продолжением этого исследования является определение энергетических показателей для различных типов искусственного подъема, как часть методологии выбора концепции искусственного подъема в ситуациях, когда нет очевидного превосходства, доступна технология искусственного подъема, например, сравнение газлифта с УЭЦН.

Ряд более подробных выводов может быть сделан в отношении скважин, исследованных в этой работе:

– Скважины демонстрируют широкий диапазон производительности с точки зрения EROI, энергоемкости и стоимости подъема. Эта информация может использоваться для ранжирования скважин и поддержки принятия решений в отношении определения приоритетов скважин.

– Преимущественная потеря энергии в системе УЭЦН находится внутри самого насоса, с гидравлическим КПД в диапазоне от 0,12 до 0,56. Улучшение эффективности насоса возможно путем регулировки скорости насоса, но данный процесс может и не улучшить энергоемкость, затраты на подъем и EROI. Тщательный анализ изменения скорости насоса требует переоценки энергии на входе, энергии на выходе и связанной с этим энергоемкости и затрат на подъем.

– Существует мало возможностей для улучшения других факторов, влияющих на эффективность системы УЭЦН.

– Обводненность, представляющая собой долю воды в добываемых жидкостях, тесно связана с энергоемкостью. Предпола-

гается, что измерения обводненности могут быть использованы для получения высокоуровневой оценки затрат на подъем для каждой скважины.

– Есть несколько скважин, которые имеют одинаковые дебиты и обводы, но с различной интенсивностью энергии и затратами на подъем. Эта информация может способствовать ранжированию скважин, определению приоритетов и принятию решений, но требует более точного измерения обводненности выше 0,9.

Список литературы

1. Большунов А.В. Современные методы диагностики фактического состояния установок электроцентробежных насосов // Успехи современного естествознания. 2019. № 12–2. С. 249–253.
2. Maystrenko A.V., Svetlakov A.A., Gandzha T.V., Dmitriev V.M., Aksenova N.V. Application of numerical signal differentiation methods to determine stationarity of a process. *Petroleum and Coal*. 2017. V. 59. I. 3. P. 311–318.
3. Ковалев А.Ю. Введение в системное моделирование установок электроцентробежных насосов: монография. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. 176 с.
4. Кагарманов И.И. Техника и технология добычи нефти. Томск, 2015. 176 с.
5. Dmitriev V.V., Gandzha T.V., Dolganov I.M., Aksenova N.V. An algorithm to improve the speed and accuracy of analysis of chemical process systems operation. *Petroleum and Coal*. 2017. V. 59. I. 3. P. 429–441.