

Ресурсно-энергетическая эффективность управления эксплуатацией скважин обустроенных ЭЦН (подходы, модели, методы)

И. Г. Соловьев
Тюменский научный центр СО РАН
igsolovyev123@gmail.com

Д. А. Говорков¹, И. В. Константинов²
Тюменский индустриальный университет
¹dagovorkov@mail.ru, ²ivkonstantinov95@yandex.ru

Аннотация. Расширение контрольно-регулирующих потенциалов технологий для скважин с электроцентробежными насосами (ЭЦН) и масштабное развитие цифровых интеллектуальных решений существенно расширяет круг определений оптимальных режимов, регламентов и параметров обустройства скважин силовыми установками. Введение показателей ресурсно-энергетической эффективности с явной оценкой периода наработки на отказ позволяет выстраивать темпоральную иерархию оптимальных решений, учитывая балансы по производительности, энергопотреблению и долговечности в условиях действий многоаспектных осложняющих факторов эксплуатации. Факторная полнота упрощенных модельных описаний управляемых процессов в схемах первичного конструирования имеет большее значение для синтеза оптимальных решений, чем детальность, доставляемая моделями универсальных интегрированных платформ, которые трудно вписываются в замкнутые цепи оперативного регулирования. Изложенная схема численно-аналитического конструирования сопоставляется с новыми подходами оптимального выбора на основе нейросетевых моделей, обученных по статистике «лучших практик» обустройства и эксплуатации ЭЦН.

Ключевые слова: скважина; модель; оптимизация; ресурсно-энергетическая эффективность

I. ВВЕДЕНИЕ

Скважина – ключевое исполнительное звено системы разработки нефтяных месторождений. Именно на данном уровне устанавливаются балансы между желаемыми показателями проекта разработки и функционально-технологическими возможностями действующих производств.

Практикуемые правила выбора режима и параметров обустройства скважин погружными электроцентробежными насосами (ЭЦН) [1] с некоторым приближением можно отразить формальной записью:

$$[q, \omega, H_N | q^0, h^0, P_2^0]^T = \arg \{ (q \rightarrow \max) \wedge (T \rightarrow \max) | \mathcal{P}_{ws} \}$$

которая означает, что для заданной скважины – \mathcal{P}_{ws} необходимо выбрать:

- центробежный насос (ЦН) с номиналом по напору – h^0 и расходу – q^0 ,

- погружной электродвигатель (ПЭД) с номинальной мощностью на валу – P_2^0 ,
- глубину подвески ЭЦН по вертикали – H_N ,
- относительную частоту питающего напряжения – ω (при обустройстве ЭЦН частотным приводом),

такие, чтобы обеспечивалась предписанная (возможно большая) производительность – q на возможно большем периоде непрерывной эксплуатации – T .

Если выбор максимальной производительности (начального тех режима) лимитируется конструктивно-прочностными параметрами ствола (кривизна, диаметр на глубине подвески), пластовыми условиями по подпору – p_R , газовому фактору – G , обводнённости – β , коэффициенту продуктивности – w_R и прочими параметрам механической устойчивости призабойной зоны, то длительность периода эксплуатации – T зависит от меры соответствия режимных состояний работы скважины комфортным условиям эксплуатации выбранных типоразмеров ЭЦН. В частности, это связано с температурой пласта – θ_R и регулируемой глубиной подвески насоса – H_N .

II. РЕСУРСНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Конкурентность двух отношений $q \wedge T \rightarrow \max$ «урегулируется» критерием прибыли, доставляемой ЭЦН на полном жизненном цикле его работы. Тогда в условиях стационарности, упрощенное представление задачи оптимального выбора режима и параметров обустройства принимает вид

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [q, \omega, H_N | q^0, h^0, P_2^0]^T = \arg \max J(\mathbf{x}), \\ J(\mathbf{x}) = T(\mathbf{x})((c_1(1-\beta) - c_2)q - c_3P_1), \end{cases} \quad (1)$$

где главные компоненты дохода и затрат критерия прибыли – $J(\mathbf{x})$ для скважины с ЭЦН учитываются дисконтированной для предприятия ценою продажи суточного объёма добычи нефти – c_1 , суточными ценами эксплуатационных – c_2 и приведённых энергетических –

c_3 затрат. Отличительная особенность обсуждаемого решения – в явном учёте оценки времени наработки, получаемой на основе вычислительной реализации факторной модели динамики освоения эксплуатационного ресурса ЭЦН. Для стационарных условий искомый период рассчитывается в явном виде:

$$T(\mathbf{x}) = T^0 \left/ \left(\frac{\gamma q}{\gamma_0 q^0} + a_1 E_p(\mathbf{x}) + a_2 E_\theta(\mathbf{x}) + a_3 E_U(\mathbf{x}) + a_4 E_H(\mathbf{x}) \right) \right. \quad (2)$$

Здесь $E_p(\mathbf{x}), E_\theta(\mathbf{x}), E_U(\mathbf{x}), E_H(\mathbf{x})$ – факторные функции ускоренного износа и старения от перегруза по мощности, перегрева, перенапряжения и заглубления соответственно, $\gamma_0 q^0$ – номинал массового расхода по воде, γq – реальный массовый расход перекачиваемой смеси, T^0 – потенциал наработки по данным изготовителя или паспорту изделия, a_i – настраиваемые коэффициенты чувствительности.

Синтез оптимальных решений осуществляется на упрощенных представлениях комплексной термобарической модели системы (рис. 1) [2], объединяющей:

- $\mathcal{P}_T, \mathcal{P}_W$ – барометрический блок подъёмника и притока с давлениями – $p(1)$ на глубине забоя – H_R , у приёма насоса – $p(3)$, в затрубном пространстве – $p(4)$ и подпоре на устье – p_L при среднем удельном весе потока – γ ;
- \mathcal{P}_N – механические характеристики ЦН по напору – h_N , КПД – η_N , потребляемой – N_1 и отдаваемой – N_2 , мощности;
- \mathcal{P}_P – энергетическую модель ПЭД, представленную схемой замещения с выходами: s – скольжение, P_2 – мощность на валу при номинале фазного напряжения – U^0 ;
- \mathcal{P}_θ – термометрический блок низа обсадной колонны и ЭЦН.

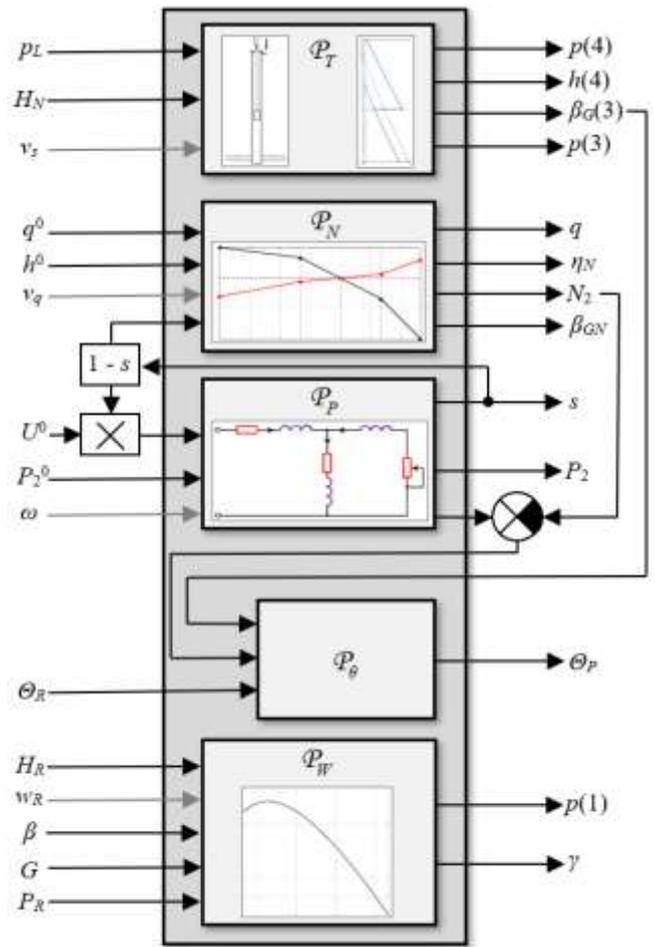


Рис. 1. Функциональная схема комплексной модели скважины (обозначения в тексте)

Результаты оптимального синтеза при типовых настройках термо-барометрической модели, восстановленных по данным режимов эксплуатации для скважин Среднего Приобья, для заданной модели ресурса (2) приведены в таблице. Здесь же для сравнения указаны результаты обустройства по типовой методике подбора, когда $q \rightarrow \max$.

ТАБЛИЦА I РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА

	δJ	δT	q	ω	H_N	q^0	h^0	P_2^0
Точка оптимума	69,7	0,81	110	1,002	2300	112	2122	90000
Максимальная производительность	64,5	0,715	130	1	2700	133	2665	90000

На рис. 2 представлены зависимости основных режимных состояний системы (q – производительность, $h(4)$ – уровень жидкости над приёмом насоса, $\beta_G(3)$ и β_{GN} – доли свободного газа у приёма и на первой ступени насоса, P_1 и N_2 – мощности потребляемая и отдаваемая ЭЦН-ом, θ_p и $\theta(3)$ – уровень нагрева ЭЦН и температура омывающего потока жидкости) от вариации

относительной частоты питающего напряжения – ω и уровня осадконакоплений в подъёмнике – v_s , а также соответствующие им графики приведённой суточной прибыли – $\delta J = J/T^0$ и доли наработки – $\delta T = T/T^0$.

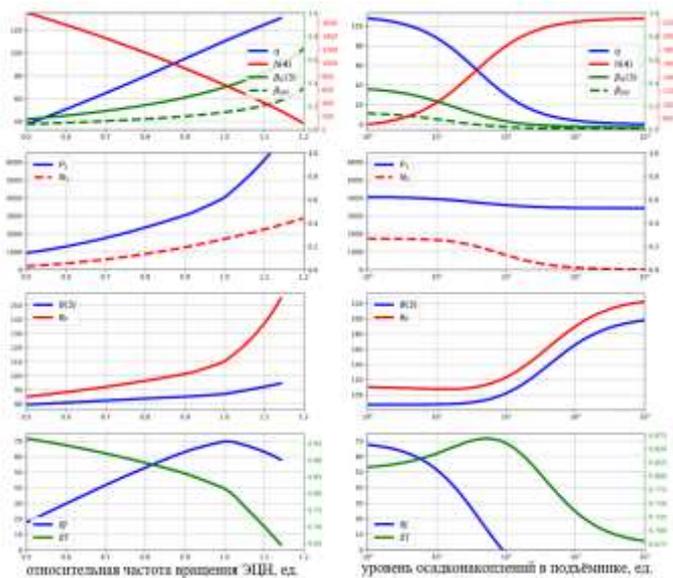


Рис. 2. Графики режимных состояний скважины, критерия прибыли и периода наработки на отказ в зависимости от частоты варшания ЭЦН (слева) и уровня осадконакоплений (справа)

Результаты расчёта свидетельствуют, что желаемое расширение регулировочного потенциала добычи посредством частотно регулируемой подачи имеет цену своего использования за счет снижения показателей ресурсно-энергетической эффективности эксплуатации системы на смещённых частотах. В этой связи следует различать задачи кратковременного регулирования (повторные пуски, освоение после глушения, расклинивание, упреждение срыва подачи) и режимы долговременной эксплуатации. Ожидаемые снижения показателей эффективности эксплуатации заметны и при деструктивных возмущениях системы.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы.

1. Дооснащение комплексной термобарической модели скважины регрессионной схемой факторного учёта динамики освоения эксплуатационного ресурса ЭЦН расширяет круг определений оптимальных решений, обосновывая более высокие показатели ресурсно-энергетической эффективности управления эксплуатацией скважин.

2. Достижение улучшенных показателей эффективности во многом связано с созданием и цифровой реализацией «проблемно-ориентированных» моделей, отражающих

- эволюцию ключевых режимных состояний из области физически допустимых значений,

- корреляции между контролируемым множеством выходных состояний, «медленной эволюцией» параметрических возмущений $\langle p_R w_R \beta | v_s v_q \rangle$ и входными управляющими воздействиями, соответствующими временной иерархии возможных сигнально-параметрических регулировок на скважине.

Заметим, что широко обсуждаемые решения по построению цифровых моделей технологий и производств на основе готовых решений, предоставляемых универсальными платформами интегрированного моделирования [3, 4] без анализа реальных проблем практики эксплуатации скважин с адекватной корректировкой целевых критериев и регулировочных потенциалов, остаются вне актуальных задач роста эффективности процессов извлечения, подъёма и транспортировки нефти.

3. Методы синтеза оптимальных решений на основе формализации критерия качества с последующей его максимизацией (минимизацией) на темпорально субординированном множестве допустимых управляющих воздействий и мероприятий, при соблюдении функциональных ограничений на режимные условия работы моделируемого объекта, позволяют одновременно учитывать многоаспектные факторы эксплуатации, производственные ограничения, плавающие цены на нефть, и прочие обстоятельства, устанавливая оптимальные пропорции между производительностью, энергопотреблением и долговечностью ЭЦН.

Определять оптимальные пропорции и, как следствие, режимы и параметры обустройства посредством регулярного обновления цен на нефть, на эксплуатационные и энергетические затраты критерия прибыли предприятия видится более обстоятельным и перспективным, чем вести обустройство, ориентируясь главным образом на потенциал продуктивности притока, что часто и реализуется на практике.

4. Особый интерес вызывают методы квази-оптимального конструирования на основе нейросетевых алгоритмов, обученных по статистике «лучших практик» [5, 6] обустройства реально работающих скважин с ЭЦН. Оставляя вне обсуждения проблемы структуризации, полноты и качества обучающей выборки данных, следует признать, что доступность, широкое обсуждение примеров и готовых решений на порядок упрощает регламенты обустройства, избавляя как проектантов, так и пользователей от понимания физики и технологий управляемых процессов. «Негласное» соглашение о лучшем решении, доставляемым «искусственным интеллектом», по сути, заменяет проблемы совершенствования технологий управления процессами нефтедобычи задачами совершенствования организационных и информационных механизмов управления проектно-производственными структурами. В новых реалиях цифровизации обнаруживаются опасные тенденции торможения научно-технологического развития фундаментальных вопросов совершенствования процессов

и технологий добычи, подъема и транспортировки углеводородов с постепенной утратой знаний и навыков о том, как были получены «лучшие решения» до того, как стали работать нейронные технологии выбора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Методика подбора установок погружных центробежных насосов к нефтяным скважинам. Электронный ресурс. URL: <http://autotechnologist.com/menu-styles/metodiki> (дата обращения 20.10.2020)
- [2] Соловьев И.Г., Константинов И.В., Говорков Д.А. Оптимизация параметров обустройства и режима эксплуатации скважины с ЭЦН в условиях осложнений // Автоматизация, телемеханизация и связь

в нефтяной промышленности. 2019. № 9. С. 28-35. doi.org/10.33285/0132-2222-2019-9(554)-28-35

- [3] PIPESIM. Steady – State Multiphase Flow Simulator. URL: <http://www.software.slb.com/products/pipesim>.
- [4] Petroleum Experts Integrated Production Modelling software. URL: <http://www.petex.com>.
- [5] Abdelaziz M., Lastra R, Xiao J.J. ESP Data Analytics: Predicting Failures for Improved Production Performance. // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi. 2017. doi.org/10.2118/188513-MS
- [6] Krikunov D., Kosyachenko S, Lukovkin D., Kunchinin A., Tolmachev R., Chebotarev R. AI-Based ESP Optimal Control Solution to Optimize Oil Flow Across Multiple Wells // SPE Gas & Oil Technology Showcase and Conference. Dubai. 2019. doi.org/10.2118/198673-MS