

Рукин Михаил Валерьевич¹, Тимашев Эдуард Олегович²

¹Нижевартовский государственный университет, Нижневартовск, Россия

²Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДНОГО ЛОПАСТНОГО НАСОСА В КРАТКОВРЕМЕННОМ ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования влияния параметров периодической откачки на тепловой режим погружного электродвигателя установок электроприводных центробежных насосов. Разработана математическая модель, учитывающая нестационарные тепловые процессы в ПЭД и омывающей его жидкости. С использованием модели проанализировано влияние длительности периодов откачки и накопления на максимальную температуру ПЭД. Результаты моделирования подтверждены данными опытно-промысловых исследований, проведенных на скважинах одного из месторождений Западной Сибири. Показано, что регулирование длительности циклов откачки позволяет оптимизировать тепловой режим ПЭД и снизить риск его перегрева. Предложены практические рекомендации по выбору оптимальных параметров режима периодической откачки, учитывающие технические ограничения оборудования и геолого-промысловые характеристики скважин.

Ключевые слова: установка электроприводного центробежного насоса, периодическая откачка, тепловой режим, погружной электродвигатель, моделирование, корректировка режима, опытно-промысловые исследования, дебит скважины по жидкости.

Введение

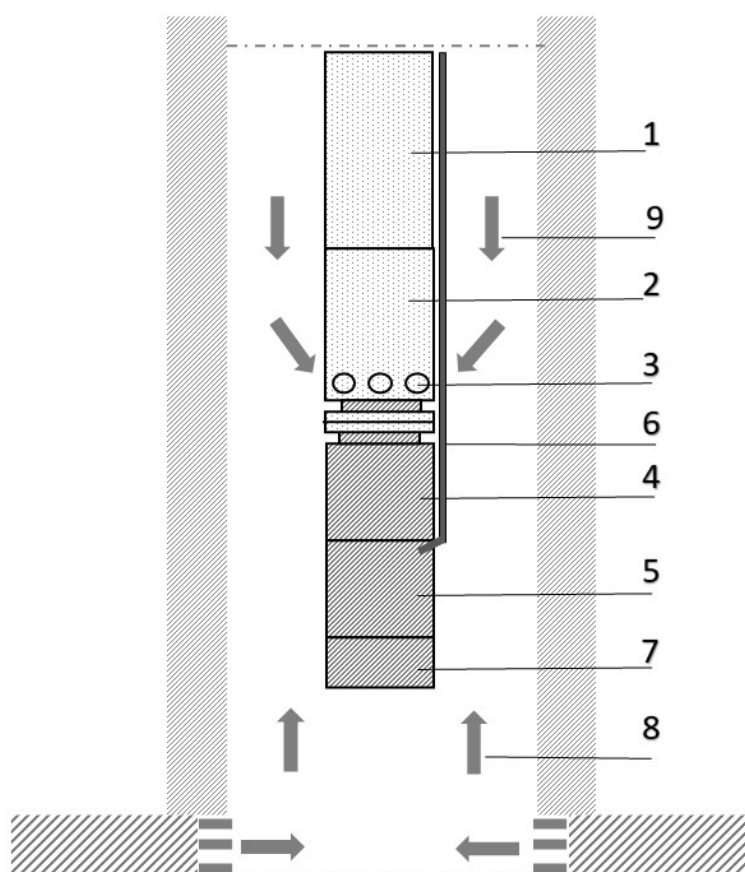
В условиях современной нефтедобычи, характеризующейся истощением запасов и необходимостью освоения трудноизвлекаемых ресурсов, все большее значение приобретают технологии механизированной

добычи, в частности, с использованием установок электроприводных центробежных (лопастных) насосов (УЭЦН, УЭЛН). УЭЦН зарекомендовали себя как эффективный способ поддержания дебита скважин, особенно в условиях высоких объемов добываемой жидкости [1,2]. Однако, в связи с общим трендом снижения дебитов скважин и переходом к эксплуатации на поздних стадиях разработки месторождений, все чаще возникает необходимость применения периодических режимов работы УЭЦН, включая периодический кратковременный режим (ПКР).

ПКР представляет собой циклический режим работы, при котором периоды откачки сменяются периодами накопления жидкости в скважине, причем длительность одного полного цикла может составлять менее 1 ч. Такой подход позволяет эффективно эксплуатировать низкодебитные скважины, используя стандартное насосное оборудование с относительно высокой производительностью[3]. Вместе с тем, применение ПКР сопряжено с рядом технических проблем, связанных, в первую очередь, с обеспечением надежности работы погружного оборудования, в частности, погружного электродвигателя (ПЭД).

Одной из ключевых проблем обеспечения надежной работы УЭЦН в условиях ПКР является поддержание эффективного теплоотвода от ПЭД. Несмотря на то, что в течение периодов накопления происходит снижение тепловой нагрузки на двигатель и его естественное охлаждение, проблема перегрева сохраняет актуальность вследствие ограниченной интенсивности теплоотвода от ПЭД в период откачки. Это связано с тем, что электроцентробежный насос (ЭЦН) в компоновке УЭЦН конструктивно расположен выше погружного электродвигателя (ПЭД) (рис. 1). В условиях эксплуатации низкодебитных скважин подача насоса в цикле откачки превышает приток пластовой жидкости. Как следствие, забор жидкости насосом осуществляется преимущественно из затрубного пространства, расположенного над ЭЦН. В результате, теплоотвод от ПЭД обеспечивается исключительно за счет притока пластовой жидкости, характеризующегося, в

условиях низкодебитных скважин, незначительным объемным расходом. Недостаточная интенсивность теплоотвода приводит к повышению температуры ПЭД, что негативно влияет на ресурс изоляции обмоток и подшипников, и, как следствие, снижает надежность и долговечность оборудования [4]. Таким образом, оптимизация теплового режима ПЭД является важной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить эффективность эксплуатации УЭЦН в условиях ПКР.



1 - электроприводный центробежный насос; 2 - входной модуль насоса; 3 - приемные отверстия; 4 - гидрозащита; 5 - погружной электродвигатель; 6 - погружной кабель; 7 - термоманометрическая система; 8 - поток жидкости из пласта; 9 - поток жидкости из затрубного пространства

Рисунок 1 – Конструктивная схема УЭЦН

Вопросы эксплуатации УЭЦН в периодическом режиме и теплового режима ПЭД рассматривались в работах ряда исследователей [5-10]. Были предложены различные подходы к оптимизации режимов работы насосов, расчету тепловых полей в скважине, а также методы прогнозирования температуры ПЭД. Однако, несмотря на значительный объем выполненных

исследований, влияние параметров периодической кратковременной откачки, в частности, длительности циклов откачки и накопления, на тепловой режим ПЭД изучено недостаточно полно. Необходимо детальное исследование динамики тепловых процессов в ПЭД и омывающей его жидкости при различных режимах ПКР для выявления оптимальных параметров, обеспечивающих минимальный риск перегрева двигателя.

Целью настоящей работы является комплексное исследование влияния длительности циклов откачки и накопления на тепловой режим ПЭД и омывающей его жидкости в условиях периодической кратковременной эксплуатации УЭЦН.

Математическая модель тепловых процессов в ПЭД

Исследование тепловых процессов выполняется с использованием математической модели теплового режима ПЭД, учитывающей нестационарный характер тепловых процессов при ПКР. Модель основана на численном решении уравнения теплопроводности в ПЭД с учетом выделения тепла в ПЭД [11]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q(t) \quad (1)$$

$$q(t) = \frac{P(t)(1-\eta(t))}{\pi R^2 L}$$

где ρ , c – эффективная плотность и удельная теплоемкость ПЭД соответственно; λ – теплопроводность; $q(t)$ – переменная удельная мощность тепловыделения в ПЭД; P , η – мощность и КПД ПЭД соответственно; R , L – внешний радиус и длина ПЭД соответственно.

Уравнение конвективного теплообмена для жидкости, омывающей ПЭД, записывается в виде [12]:

$$\rho_f c_f S_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f c_f Q \frac{\partial T_f}{\partial z} = h(T - T_f) + h_c(T_g - T_f) \quad (2)$$

где T_f – температура жидкости; T_g – естественная температура горных пород; ρ_f , c_f – эффективные теплофизические свойства жидкости (плотность и

удельная теплоемкость соответственно); S_f – площадь кольцевого пространства между внешней стенкой ПЭД и внутренней стенкой обсадной колонны радиусом R_c ; Q – объемный расход жидкости; h – коэффициент теплоотдачи, определяющий интенсивность теплообмена между нагретой поверхностью ПЭД и омывающим потоком; h_c – коэффициент теплопередачи, учитывающий теплоотдачу от флюида к внешней среде, включая колонну и горные породы.

Дифференциальное уравнение для расчета динамики забойного давления имеет вид

$$K_p (p_{res} - p_b) dt = \frac{S_z dp_b}{\rho_f g} + Q_p dt \quad (3)$$

где K_p – коэффициент продуктивности пласта; p_{res} , p_b – пластовое и забойное давление соответственно; Q_p – подача насоса; ρ_f – плотность жидкости в затрубном пространстве; S_z – площадь поперечного сечения кольцевого затрубного пространства. В начальный момент времени забойное давление равно пластовому p_{b0} .

Уравнение (3) имеет аналитическое решение, позволяющее спрогнозировать изменение забойного давления в процессе кратковременной периодической эксплуатации скважины. Динамика забойного давления в полцикле откачки рассчитывается согласно зависимости

$$p_b(t) = p_{res} - \frac{Q_p}{K_p} - \left(p_{res} - p_{b_max} - \frac{Q_p}{K_p} \right) \exp\left(-\frac{\rho_f g K_p t}{S_z} \right) \quad (4)$$

где p_{b_max} – максимальное забойное давление в скважине, достигаемое в конце полцикла накопления. При известной продолжительности периода откачки t_{pump} минимальное забойное давления, достигаемое в конце полцикла откачки, рассчитывается из (4) как

$$p_{b_min} = p_{res} - \frac{Q_p}{K_p} - \left(p_{res} - p_{b_s} - \frac{Q_p}{K_p} \right) \exp\left(-\frac{\rho_f g K_p t_{pump}}{S_z} \right) \quad (5)$$

В полуцикле накопления с учетом нулевой подачи насоса и начального забойного давления p_{b_min} получим

$$p_b(t) = p_{res} - (p_{res} - p_{b_min}) \exp\left(-\frac{\rho_f g K_p}{S_z} t\right) \quad (6)$$

Максимальное забойное давление в скважине p_{b_max} можно найти из (6) при подстановке в него времени $t=t_{stop}$, соответствующего длительности периода накопления.

Расход потока в обсадной колонне с учетом известной динамики забойного давления определяется по формуле

$$Q(t) = K_p (p_{res} - p_b(t)) \quad (7)$$

Анализ результатов моделирования

Принятые при моделировании параметры: длительности периодов откачки и накопления 10 и 20 мин соответственно, приток пластовой жидкости в установившемся режиме $20 \text{ м}^3/\text{сут}$, подача насоса – $60 \text{ м}^3/\text{сут}$, начальная температура флюида, омывающего ПЭД, 80°C , естественная температура горных пород на глубине подвески ПЭД 75°C , обводненность жидкости 70%, типоразмер ПЭД 1ВЭДБТ63-117/3М1В5, мощность тепловыделения в ПЭД 6.3 кВт , внешний диаметр ПЭД 117 мм, длина ПЭД 3.6 м, теплопроводность воды, нефти, цемента и горных пород 0.6, 0.2, и $1.2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ соответственно, плотность воды, нефти 1000 и $850 \text{ кг}/\text{м}^3$ соответственно, удельная теплоемкость воды и нефти 4200 и $2000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ соответственно, внутренний и внешний радиусы обсадной колонны 65 и 73 мм соответственно, внешний диаметр НКТ 73 мм, глубина кровли пласта 2000 м, пластовое давление 18 МПа, коэффициент продуктивности пласта $5 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{МПа})$.

Динамика температуры ПЭД (рассчитана максимальная температура в центре ПЭД) и обтекающей жидкости (на выходе из области ПЭД в процессе периодической эксплуатации представлена на рисунке 2.

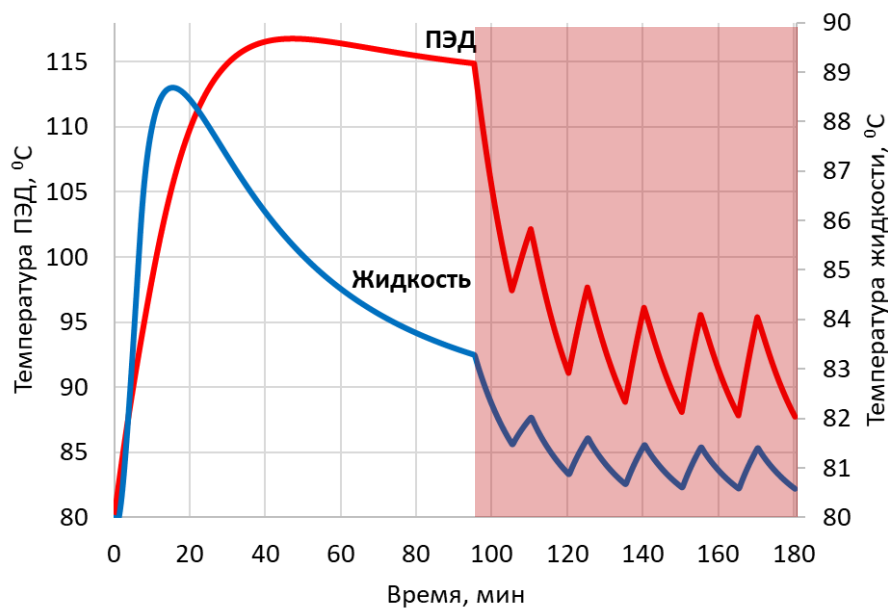


Рисунок 2 – Динамика температуры ПЭД и обтекающей жидкости (цветом выделена работа ПЭД в режиме ПКР)

В процессе вывода скважины на режим в условиях неустановившегося потока в обсадной колонне и непрерывной работе УЭЦН температура ПЭД и жидкости достигает максимальных значений (116.8 и 88.7 °C соответственно). При дальнейшей эксплуатации скважины в режиме ПКР температура ПЭД и скважинного флюида существенно снижается, максимальная температура ПЭД в конце полупериода откачки составляет около 95.1 °C, температура обтекающей ПЭД жидкости не превышает 81.4 °C. Нагрев ПЭД и жидкости (под нагревом ΔT понимается повышение температуры относительно начальной) при выводе на режим достигает 36.8 и 8.7 °C соответственно, в режиме ПКР составляет 15.1 и 1.4 °C соответственно. Тепловой режим ПЭД при ПКР устанавливается в течение 4-5 циклов периодической работы. Амплитуда изменения температуры ПЭД флюида в режиме ПКР составляет около 7.4 и 0.8 °C соответственно.

Влияние длительности периодов откачки и накопления на температуру ПЭД и жидкости (после вывода скважины на режим) показано на рис. 3. Рассмотрены длительности откачки 5,10,15 минут, при этом длительность

периода накопления подбиралась исходя из условия обеспечения требуемого дебита скважины 30 м³/сут при подаче насоса в этом режиме 90 м³/сут.

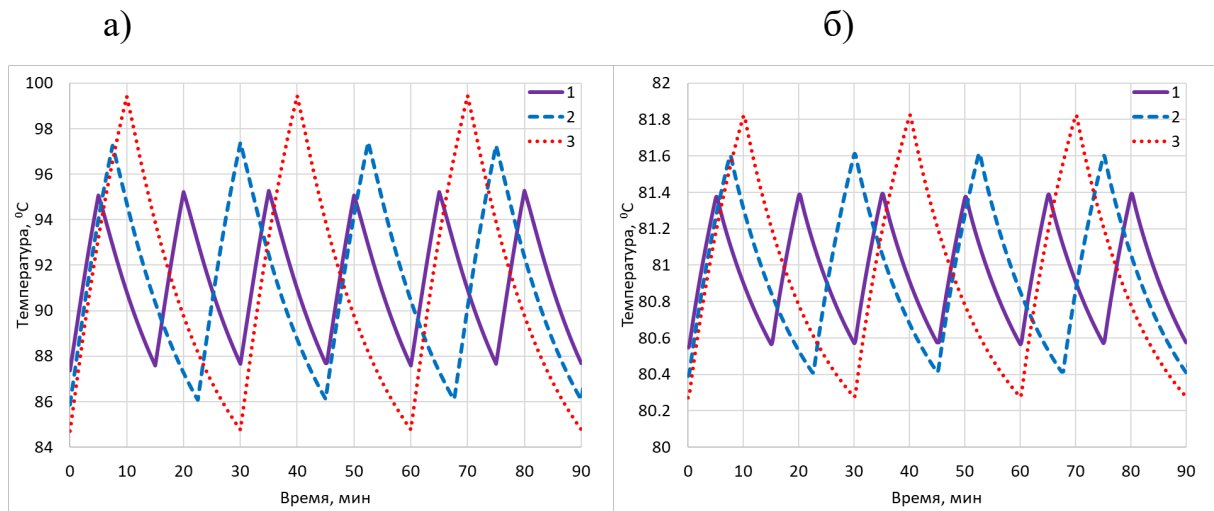


Рисунок 3 –Влияние длительности периода откачки и накопления на температуру ПЭД (а) и обтекающей жидкости (б) (1 – период откачки $t_1=5$ мин, накопления $t_2=10$ мин; 2 – $t_1=7.5$ мин, $t_2=15$ мин; 3 – $t_1=10$ мин, $t_2=20$ мин) после вывода скважины на режим

С увеличением длительности периода откачки, несмотря на пропорциональный рост длительности периода накопления, температура ПЭД и жидкости возрастает. Например, при длительности периода откачки $t_1 = 5$ мин максимальная температура ПЭД и жидкости составляет 95.1 и 81.4°C соответственно, при $t_1 = 10$ мин она достигает 99.5 и 81.8°C соответственно (нагрев ПЭД и жидкости увеличивается на 29%). Таким образом, с точки зрения снижения амплитудной температуры узлов УЭЦН при ПКР необходимо устанавливать максимально короткие периоды циклов откачки и накопления. С другой стороны, при пуске-остановке в электрических узлах УЭЦН развиваются повышенные токовые нагрузки, для их предупреждения требуется плавный пуск и остановка скважины. В результате длительность периодов откачки и накопления должна выбираться с совокупным учетом технических возможностей станции управления УЭЦН, геолого-технических и эксплуатационных характеристик скважины и продуктивных пластов.

Результаты промышленных исследований

Проведенные на основе математической модели расчеты показали, что длительность циклов периодической откачки оказывает значительное влияние на температуру ПЭД. Проведенные на основе математической модели расчеты показали, что длительность циклов периодической откачки оказывает значительное влияние на температуру ПЭД. В частности, увеличение длительности периода откачки при фиксированном суммарном дебите приводит к росту максимальной температуры ПЭД в течение цикла. Это связано с тем, что при более длительной работе насоса тепловыделение в двигателе превышает теплоотвод, приводя к его нагреву. И наоборот, при уменьшении длительности периода откачки ПЭД успевает лучше охладиться в период простоя, что снижает его максимальную температуру. Таким образом, регулируя длительность периодов откачки и накопления, можно оптимизировать тепловой режим ПЭД и минимизировать риск его перегрева. Однако, следует учитывать, что чрезмерное сокращение длительности циклов откачки нецелесообразно ввиду повышенных электрических и механических нагрузок на узлы УЭЦН.

Для исследования эффективности предложенного подхода выполнены опытно-промышленные исследования (ОПИ) по корректировке технологического режима электроцентробежных установок, работающих в режиме периодической откачки, для пяти добывающих скважин для пяти добывающих скважин одного из месторождений Западной Сибири. На основе расчетов с использованием математической модели теплового поля погружного двигателя спроектирован и реализован на скважинах альтернативный технологический режим скважин, позволяющий снизить максимальную температуру ПЭД при одновременном сохранении дебита скважины по жидкости. Сводные результаты ОПИ приведены в таблице.

Таблица – Температура ПЭД для скважин ОПИ

Скважина	Дебит по жидкости, м ³ /сут	Длительность периодов откачки и	Максимальная температура обмоток	Длительность периодов откачки и	Максимальная температура обмоток ПЭД	Максимальная температура
----------	--	---------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------	--------------------------

		накопления до оптимизации, мин	ПЭД до оптимизации, °С	накопления после оптимизации, мин	фактическая после оптимизации, °С	обмоток ПЭД расчетная, °С
№1	19	20; 20	112	12; 12	100 (-12)	102
№2	39	27; 9	111	15; 5	101 (-10)	100
№3	25	40; 35	108	32; 28	102 (-6)	103
№4	23	18; 42	114	9; 21	103 (-11)	105
№5	80	18; 13.5	119	8; 6	109 (-10)	111

Особенностью выбранных скважин является различное соотношение между длительностью периодов откачки и накопления (жидкости): для скважин №2 и 5 длительность периода откачки превышает длительность периода накопления, для скважины №4 длительность периода накопления превышает длительность периода откачки, для скважин №1 и №3 длительности в целом близки.

Рассмотрим детально результаты для скважины №5, эта скважина выбрана в связи с максимальной достигаемой температурой ПЭД, близкой к верхней границе допустимой температуры 120 °С. Скважина №5 оборудована УЭЦН 2А габарита с погружным двигателем серии ПВЭДН габаритом 81 мм, номинальная мощность 80 кВт. Среднесуточный дебит скважины по жидкости составляет 80 м³/сут, обводненность продукции 64%. Длительность периодов откачки и накопления по скважине составляла до корректировки 18 и 13.5 мин соответственно, при этом максимальная температура ПЭД достигала 119 °С. После смены режима путем снижения длительности периодов откачки и накопления (8 и 6 мин соответственно) температура ПЭД уменьшилась до 109 °С. Результаты моделирования для данной скважины также показали хорошее согласие с фактическими данными замеров (рис. 4). Расчетная максимальная температура ПЭД после корректировки режима (111 °С) несколько превышает фактическую величину (109 °С), расчетная минимальная температура ПЭД (99 °С) ниже фактической (102 °С). Максимальная температура ПЭД до корректировки режима составила 119 °С, результаты моделирования оказались несколько выше (121 °С).

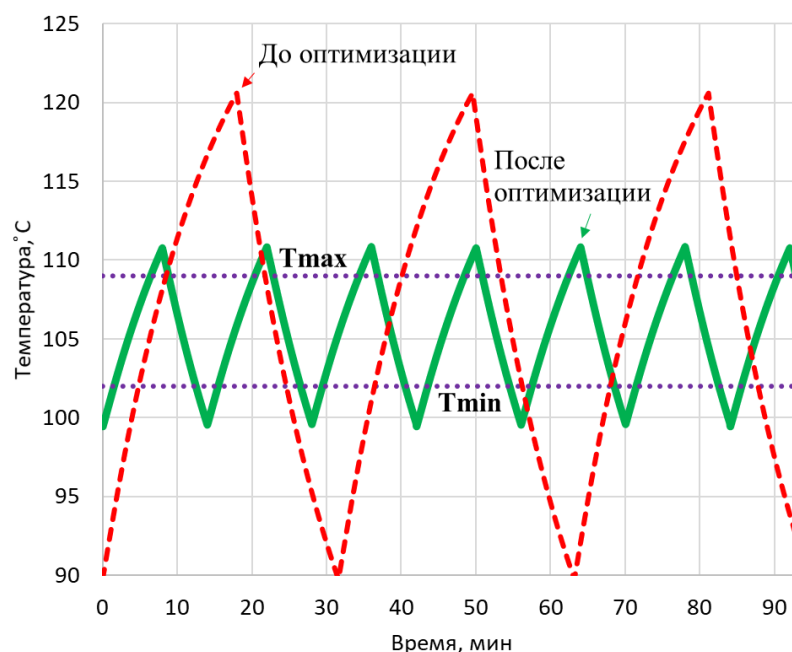


Рисунок 4– Динамика температуры ПЭД до и после корректировки режима скважины №370 Карамовского месторождения (T_{max} , T_{min} – фактическая максимальная и минимальная температура ПЭД после оптимизации соответственно)

Результаты проведенных ОПИ подтвердили эффективность предложенного подхода к оптимизации теплового режима ПЭД путем регулирования длительности циклов периодической откачки. В рассмотренных примерах удалось снизить максимальную температуру ПЭД на 6-12 °C при сохранении дебита скважин по жидкости. Следует отметить, что в случаях, когда температура ПЭД значительно ниже максимально допустимой, можно, наоборот, увеличить продолжительность циклов откачки и накопления. Это позволит снизить частоту пусков и остановов ПЭД, что приведет к уменьшению пусковых токов и механических нагрузок на узлы УЭЦН, тем самым увеличивая срок службы оборудования. Окончательный выбор параметров ПКР должен основываться на комплексном анализе, учитывающем как тепловой режим ПЭД, так и характеристики оборудования.

Выводы

1. Результаты математического моделирования теплового режима ПЭД при работе УЭЦН в режиме периодической кратковременной откачки показали, что длительность циклов периодической откачки оказывает значительное влияние на тепловой режим ПЭД. Увеличение продолжительности периода откачки при прочих равных условиях приводит к повышению максимальной температуры ПЭД. Это связано с тем, что при более длительной работе двигателя тепловыделение превышает теплоотвод, что приводит к его нагреву. Регулирование длительности периодов откачки и накопления является эффективным способом оптимизации теплового режима и предотвращения перегрева ПЭД.

2. Опытные-промышленные исследования, проведенные на скважинах одного из месторождений Западной Сибири, подтвердили эффективность предложенного подхода к оптимизации теплового режима ПЭД путем регулирования длительности циклов откачки. В рассмотренных примерах удалось добиться снижения максимальной температуры ПЭД при сохранении или даже увеличении дебита скважин. Кроме того, было показано, что в случаях, когда температура ПЭД значительно ниже максимально допустимой, целесообразно увеличивать продолжительность циклов откачки для снижения нагрузок на электрические и механические узлы УЭЦН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Справочник по добыче нефти: Посвящается 15-летию Корпоративного научно-проектного комплекса ПАО «НК «Роснефть»** / К. Р. Уразаков, Э. О. Тимашев, В. А. Молчанова, М. Г. Волков. Пермь: ООО "Астер Плюс", 2020. 600 с.

2. **Эксплуатация скважин установками электропогружных центробежных насосов на нефтяных месторождениях Татарстана** / В. М. Валовский, К. В. Валовский, В. Г. Фадеев, А. В. Артюхов. Москва : Нефтяное хозяйство, 2018. 470 с.

3. **Об оптимизации периодического режима эксплуатации скважин, оборудованных установками электроцентробежных насосов, в ПАО "НК "Роснефть"** / А. А. Пашали, Р. С. Халфин, Д. В. Сильнов и др. // Нефтяное хозяйство. 2021. № 4. С. 92-96.

4. **Язьков А.В.** Исследование влияния изменения технологических параметров на охлаждение погружного электродвигателя // Нефтяное хозяйство. 2007. № 11. С. 125-128.

5. **Абдулин И. К., Леонтьев С. А.** Разработка методики обоснования кратковременного периодического режима работы скважин, оборудованных установками электроцентробежных насосов // Нефтепромысловое дело. 2022. № 9(645). С. 73-76.

6. **Видинеев А. С.** Определение оптимального режима кратковременной периодической эксплуатации малодебитных скважин с помощью установки электроцентробежного насоса // Нефтепромысловое дело. 2022. № 3(639). С. 41-45.

7. **Гизатуллин Р. Р. Пещеренко С. Н., Шиверский А. В.** Тепловой расчет погружных электродвигателей// Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. № 12(108). С. 1-24.

8. **Конюхов В. М. Конюхов И. В., Чекалин А. Н.** Математическое моделирование и параллельные вычисления процессов тепломассопереноса при эксплуатации единого комплекса «нефтяной пласт - система скважин - электроцентробежные насосы» // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 10. С. 195-202.

9. **Купцов С. М.** Температурное поле погружного электродвигателя скважинных насосных установок // Территория Нефтегаз. 2010. № 4. С. 36-39.

10. **Динамическая модель тепловых процессов в погружном электродвигателе насосной установки нефтедобывающей скважины** / И. Ф. Нугаев, И. С. Байгускаров, А. В. Стыскин, Н. Г. Уразбахтина // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 3. С. 38-44.

11. Nonisothermal fluid flow in a well during induction heating of the casing string / F. F. Davletshin, R. Z. Akchurin, R. F. Sharafutdinov, D. F. Islamov // Fluid Dynamics. 2023. Vol. 58. No. 4. P. 586-597.

12. Уразаков К. Р., Рукин М. В., Борисов А. О. Моделирование тепловых процессов в погружном двигателе электроцентробежного насоса, работающего в периодическом режиме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 4. С. 62-71.

13. Исследование теплового поля в скважине при заколонном движении жидкости в процессе индукционного воздействия / Ф. Ф. Давлетшин, А. Ш. Рамазанов, Р. З. Акчурин [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 3. – С. 153-164.

14. Уразаков К. Р., Рукин М. В. Исследование эффективности потокоотклоняющего устройства при эксплуатации УЭЦН в периодическом режиме // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 596-601.