

На правах рукописи

Старшая Валерия Владимировна



**ДЕПАРАФИНИЗАЦИЯ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН НА
ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКОЙ**

*Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и
системы*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Шклярский Ярослав Элиевич

Официальные оппоненты:

Семькина Ирина Юрьевна

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», учебно-научный центр информационных технологий обучения, директор центра;

Доброскок Никита Александрович

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра систем автоматического управления, заместитель заведующего кафедрой по научной работе.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **28 сентября 2023 года в 15:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 28 июля 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Постепенное истощение крупных нефтегазоносных залежей приводит к необходимости совершенствования существующих технологий разработки новых месторождений, включая малые месторождения с запасами менее 1 млн тонн, доля которых составляет до 12% от общего запаса нефти в Российской Федерации. Разработка таких месторождений будет существенно отличаться от традиционных и осложняться отсутствием развитой транспортной сети, и самое главное удаленностью от системы централизованного электроснабжения. Территориальная рассредоточенность потребителей электроэнергии, рост затрат на сооружение и техническое обслуживание линий электропередач являются основными преградами на пути повышения надежности и экономичности электроснабжения. Кроме этого, эксплуатация месторождений с трудноизвлекаемыми запасами осложняется образованием парафиновых отложений (ПО) на внутренней поверхности стенок насосно-компрессорных труб нефтяных скважин. В России около 78% от всех нефтяных месторождений по концентрации ПО являются средне- (концентрация парафина в нефти от 1,5 до 6%) и высокопарафинистыми (концентрация парафина от 6 до 10%). Большинство парафинистых нефтей находится в Волго-Уральской, Западно-Сибирской и Северо-Кавказской нефтегазоносных провинциях, обеспечивающих свыше 80% от всей добычи нефти в стране. Электротермические методы прогрева нефтяных скважин признаны одними из наиболее эффективных способов предотвращения образования и удаления ПО. Однако, использование данных методов теплового воздействия может быть ограничено недостаточной подготовленностью объектов к промышленному освоению; износом энергетической инфраструктуры; экологическими проблемами, связанными с добычей нефти. Тема диссертации является актуальной, поскольку разработка и внедрение автономных электротехнических комплексов (ЭТК) с питанием от фотоэлектрической установки (ФЭУ) позволит повысить энергоэффективность

электроснабжения труднодоступных месторождений, включая малые месторождения, удаленные от централизованной энергосистемы; предотвратить образование ПО в нефтяных скважинах; обеспечить энергосбережение за счет сокращения потребления электроэнергии; повысить экологическую безопасность эксплуатации нефтяных месторождений.

Степень разработанности темы исследования

В последние годы было представлено много исследовательских работ по использованию солнечной энергии в качестве альтернативного энергоресурса. Исследованиями в области повышения энергоэффективности электроснабжения объектов нефтяной отрасли на основе применения автономных ЭТК занимались многие ученые, среди которых стоит отметить как отечественных, так и зарубежных ученых: Абрамович Б.Н., Сивков С.И., Федотова А.И., Велькин В.И., Bell A., Kosmadakis I.E., Bortolini M., Kazem H.A. и др. Однако в данной области остались вопросы, требующие дальнейшей проработки: обоснование возможности использования ФЭУ в качестве единственного источника энергии для обеспечения автономного электропитания объектов нефтяной промышленности с периодическим режимом работы; обеспечение структурной и параметрической достаточности ЭТК для депарафинизации и повышения энергоэффективности работы нефтяных скважин.

Объект исследования – автономный ЭТК с питанием от ФЭУ для депарафинизации нефтяных скважин.

Предмет исследования – параметрическая достаточность ЭТК для депарафинизации нефтяных скважин, его оптимизация, а также разработка алгоритма управления.

Цель работы – повышение энергоэффективности работы нефтяных скважин путем разработки автономного электротехнического комплекса с фотоэлектрической установкой для предотвращения образования парафиновых отложений в насосно-компрессорных трубах (НКТ) с учетом периодических режимов

работы источника электроснабжения для различных способов добычи нефти.

Идея работы. Депарафинизация нефтяных скважин достигается за счет использования ФЭУ в качестве энергоэффективного автономного источника электроснабжения электрического греющего кабеля, которая обеспечит предотвращение образования парафиновых отложений в течение года без дополнительных источников энергии при условии компенсации стохастического характера прихода солнечного излучения за счет эффекта теплового аккумулятора в скважине и времени межочистного периода.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ современного состояния проблемы электроснабжения нефтяных месторождений парафинистой нефти, удаленных от централизованной энергосистемы. Обоснование необходимости внедрения автономного электропитания от ФЭУ.

2. Определение степени влияния физико-химических свойств нефти и характеристик эксплуатации нефтяных скважин на необходимое количество электроэнергии для электротермического прогрева для предотвращения образования парафиновых отложений.

3. Математическое моделирование учета стохастического изменения солнечного излучения и анализ параметров фотоэлектрических панелей для обоснования структуры и параметров автономного ЭТК с ФЭУ.

4. Разработка имитационной модели автономного ЭТК с питанием от ФЭУ, позволяющей оценить величину генерируемой энергии в зависимости от структуры комплекса и параметров системы генерации.

5. Выявление зависимостей процесса депарафинизации нефтяной скважины от годовой выработки электрической энергии ФЭУ для обоснования структурной и параметрической достаточности ЭТК и выбора оптимальных параметров комплекса.

6. Разработка и проведение экспериментальных исследований на физической модели ЭТК с ФЭУ для проверки адекватности математического и имитационного моделирования.

7. Разработка методики обоснования структуры и параметров ЭТК с ФЭУ для депарафинизации нефтяных скважин. Экономическое и экологическое обоснование эффективности применения автономного ЭТК с ФЭУ на нефтяных месторождениях, удаленных от централизованной энергосистемы.

Научная новизна работы:

Определены зависимости установленной мощности ФЭУ с учетом стохастического изменения солнечного излучения от основных параметров нефтяной скважины и характеристик нефти, выбранных на основе факторного анализа: коэффициента обводненности продукции, суточного дебита, диаметра НКТ, длины ствола скважины и коэффициента теплопередачи между скважинной продукцией и горной породой.

Выявленные медианные электрические, механические и эксплуатационные параметры российских фотоэлектрических панелей являются теоретической основой для имитационного моделирования ЭТК с ФЭУ.

Разработана методика обоснования структуры и выбора параметров автономного ЭТК с ФЭУ, при применении которой обеспечивается требуемое количество электроэнергии для депарафинизации нефтяных скважин с фонтанным и механизированным способом добычи нефти.

Обоснована возможность использования автономного ЭТК с ФЭУ для депарафинизации нефтяных скважин в квазипериодическом режиме работы за счет установленных оптимальных параметров комплекса, при которых отсутствует период внепланового простоя нефтяных скважин.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Методические рекомендации по выбору состава электро-технического комплекса с ФЭУ и параметров односторонних ФЭП

при проведении технико-экономического обоснования внедрения автономной системы электротермического прогрева нефтяных скважин внедрены в производственный процесс ООО «НТЦ ТПТ».

Результаты могут быть использованы в качестве теоретического руководства и/или экспериментальной базы при проектировании новых или модернизации существующих автономных электротехнических комплексов с ФЭУ.

Акт внедрения результатов диссертации в ООО «НТЦ ТПТ» утвержден генеральным директором Ореховым Д.Л. 26.12.2022 г.

Методология и методы исследования. В рамках диссертационной работы теоретические научные исследования осуществлялись с использованием методов численного анализа и сбора больших данных в пакете Excel и MathCad; при разработке электротехнического комплекса применялись методы аналитического уравнения тренда, программирование на языке Python, математического моделирования и прогнозирования. Имитационное моделирование осуществлялось в системе MatLab Simulink; апробация результатов проведена на основе результатов лабораторных и экспериментальных исследований.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Использование фотоэлектрической установки без дополнительных источников электроэнергии в качестве автономного источника электропитания электротехнического комплекса должно быть основано на применении разработанной методики обоснования структуры и параметров комплекса с учётом физико-химических свойств нефти, характеристик эксплуатации нефтяной скважины, вариации солнечного излучения в месте размещения при фонтанном и механизированном способах добычи нефти.

2. Обеспечение выбора достаточной номинальной мощности фотоэлектрической установки в составе автономного электротехнического комплекса для депарафинизации и повышения энергоэффективности работы нефтяных скважин должно осу-

ществляться с учетом установленной зависимости времени простоя скважины от угла наклона фотоэлектрических панелей и влияния длины электрического греющего кабеля, размещенного внутри насосно- компрессорной трубы.

Степень достоверности результатов исследования.

Защищаемые научные положения, выводы и рекомендации подтверждают свою достоверность применением известных теорий и методов математического моделирования электротехнических комплексов, компьютерного имитационного моделирования, а также результатами проведенных лабораторных и экспериментальных исследований.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на всероссийских и международных конференциях: Международная конференция «Менеджмент, экономика, этика, технология 2022», г. Санкт-Петербург, 2022 г.; Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», г. Санкт-Петербург, 2022 г.; Всероссийская конференция «Полезные ископаемые России», г. Санкт-Петербург, 2022 г.; Международная конференция «Менеджмент, экономика, этика, технология 2021», г. Санкт-Петербург, 2021 г.; Первая международная конференция «Человек в Арктике», г. Санкт-Петербург, 2021 г.; Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», г. Санкт-Петербург, 2022 г.; Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021», г. Санкт-Петербург, 2021 г.; International Scientific Electric Power Conference ISEPC-2021, г. Санкт-Петербург, 2021 г.; Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», г. Санкт-Петербург, 2021 г.; Международная конференция «IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering», г. Санкт-Петербург, 2020 г.; Международный молодежный научно-практический форум «Нефтя-

ная столица», г. Ханты-Мансийск, 2020 г.; Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов, г. Санкт-Петербург, 2020 г.

Личный вклад автора. Сформулированы цели, задачи, научные положения. Принято участие во всех этапах исследований в рамках диссертации. Обоснована структура и состав ЭТК с учётом реологических свойств нефти, характеристик эксплуатации нефтяной скважины, вариации солнечного излучения. Сформированы зависимости, позволяющие произвести оптимизацию параметров ФЭУ для депарафинизации нефтяных скважин. Проведено имитационное и экспериментальное моделирование режимов работы ЭТК. Доказана эффективность применения ЭТК с ФЭУ для электротермического прогрева скважин.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 22 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 6 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных (номер свидетельства 2020620747), подана 1 заявка на программу для ЭВМ (номер заявки 2023660166/69, дата приоритета 23.05.2023).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 124 наименования, 3 приложения. Диссертация изложена на 164 страницах машинописного текста, содержит 98 рисунков и 24 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность кандидату технических наук, доценту кафедры электроэнергетики и электромеханики Горного университета Бельскому Алексею Анатольевичу за помощь в подготовке и

проведении научных исследований и формировании главной идеи диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе обосновано применение электрического греющего кабеля для предотвращения образования ПО в нефтяных скважинах. Рассмотрены проблемы электропитания удаленных от централизованного электроснабжения нефтяных месторождений. Выявлены месторождения с парафинистой нефтью, перспективные с точки зрения использования их солнечного потенциала. Обоснована возможность использования ФЭУ в составе ЭТК. Выполнен анализ современных типов и устройств ФЭУ.

Во второй главе оценено влияние физико-химических свойств нефти и характеристик эксплуатации нефтяных скважин на необходимое количество электроэнергии для электротермического прогрева для предотвращения образования ПО. Предложена математическая модель стохастического изменения солнечного излучения. Определены наилучшие и медианные характеристики российских фотоэлектрических панелей (ФЭП) для имитационного моделирования в Matlab Simulink. Обоснован выбор мощности ФЭУ в составе ЭТК с учетом вариации солнечных ресурсов, потребляемой электроэнергии греющим кабелем, характеристик эксплуатации нефтяных скважин и свойств добываемой продукции.

В третьей главе разработана имитационная модель ЭТК с ФЭУ, DC/DC-преобразователем напряжения с алгоритмом отслеживания точки максимальной мощности (MPPT) и электрическим греющим кабелем. Проведено имитационное моделирование процесса депарафинизации нефтяной скважины при использовании автономного ЭТК. Установлены оптимальные параметры комплекса. Обоснована структурная и параметрическая достаточность автономного

ЭТК с ФЭУ. Изложены результаты моделирования и экспериментальных исследований.

В четвертой главе выполнено технико-экономическое обоснование использования ФЭУ в качестве автономного источника электроснабжения электрического греющего кабеля в составе ЭТК на нефтяных месторождениях парафинистой нефти. Обоснована экологическая эффективность использования разработанного ЭТК с ФЭУ с учетом жизненного цикла оборудования.

В заключении представлены выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Использование фотоэлектрической установки без дополнительных источников электроэнергии в качестве автономного источника электропитания электротехнического комплекса должно быть основано на применении разработанной методики обоснования структуры и параметров комплекса с учётом физико-химических свойств нефти, характеристик эксплуатации нефтяной скважины, вариации солнечного излучения в месте размещения при фонтанном и механизированном способах добычи нефти.

Структура автономного ЭТК с питанием от ФЭУ, DC/DC-преобразователем с МРРТ-алгоритмом и электрическим греющим кабелем (ЭГК) с постоянным сопротивлением $R_{\text{ЭГК}}$, представлена на рисунке 1.

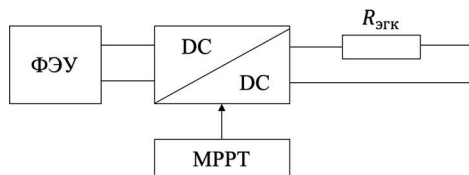


Рисунок 1 – Структура автономного ЭТК с ФЭУ для депарафинизации нефтяных скважин

Выполнена оценка возможности использования ФЭУ в качестве источника электропитания автономного ЭТК без дополнительных источников для депарафинизации нефтяных скважин.

Для достижения поставленной цели разработана методика обоснования структуры и выбора параметров автономного ЭТК.

В качестве источника депарафинизации нефтяных скважин с фонтанным и механизированным (с применением электроцентробежного насоса (ЭЦН)) способами добычи нефти, используется электрический резистивный греющий кабель, расположенный внутри НКТ скважины. Распределение температуры добываемой жидкости от забоя к устью в зависимости от дебита и способа добычи представлены на рисунках 2а, б. Количество энергии, необходимое для поддержания температуры нефти выше температуры образования ПО, рассчитывается по формуле 1:

$$Q_k = cm(t_0 - t), \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость водонефтяной смеси, Дж/(кг·°С); m – масса смеси на исследуемом участке, кг; t_0 – температура насыщения нефти парафином, °С; t – температура нефти, °С.

Для определения температуры насыщения нефти парафином использована методика, рекомендованная ВНИИнефть. В расчетах принимается, что температура плавления парафина выше температуры образования парафина на 15°С. Зависимость удельной мощности ЭГК от дебита скважины при различных концентрациях парафина представлена на рисунке 3. В ходе работы установлены зависимости потребляемой электроэнергии электрическим греющим кабелем от физико-химических свойств нефти и характеристик эксплуатации нефтяной скважины. Установленная мощность ФЭУ определена по формуле 2:

$$P_{\text{ФЭУ}} = \frac{W \cdot P_{\text{уст фэп}}}{E \cdot S \cdot \eta_{\text{фэп}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где W – потребляемая электроэнергия электрическим греющим кабелем, кВт·ч/сут; $P_{\text{уст фэп}}$ – установленная мощность ФЭП, кВт;

E – солнечное излучение, кВт·ч/сут/ м² ; S – площадь ФЭП, м²; $\eta_{\text{фэп}}$ – коэффициент полезного действия ФЭП, %.

В работе рассмотрены существующие методики расчета солнечного излучения с учетом облачности (рисунок 4). Отклонение солнечного излучения от действительных значений по методике Блека Д. составило 31%, по методике Берлянда Т.Г. – 21%.

Для моделирования стохастического изменения солнечного излучения с учетом коэффициента облачности $K_{\text{обл}}$ адаптировано соотношение регрессии к местонахождению ФЭУ в форме полиномиального кубического уравнения. Зависимость между $K_{\text{обл}}$ и отношением действительного солнечного излучения E к расчётному I представлена на рисунке 5. Стохастический характер солнечного излучения предлагается определять по формуле 3:

$$E = \Sigma I (1 - 0,6802 K_{\text{обл}}^3 + 0,4614 K_{\text{обл}}^2 - 0,0997 K_{\text{обл}} - 0,0947), \quad (3)$$

где ΣI – суммарное глобальное солнечное излучение при ясном небе, Вт/м².

Результаты математического моделирования стохастического изменения солнечного излучения с 320-го по 326-ой день в году с учетом облачности представлены на рисунке 6. Годовое стохастическое изменение солнечного излучения на горизонтальную поверхность ФЭП, расположенных вблизи нефтяного месторождения парафинистой нефти в Астраханской области представлено на рисунке 7.

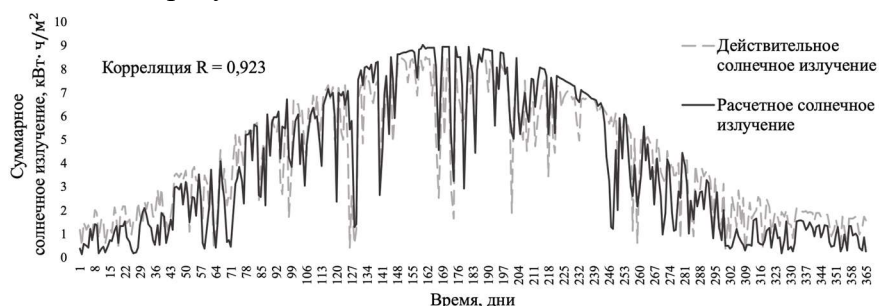


Рисунок 7 – Годовое стохастическое изменение солнечного излучения на горизонтальную поверхность ФЭП

Отклонение расчетного солнечного излучения с учетом коэффициента облачности от действительных значений солнечного излучения не превышает 10%, корреляция Пирсона $R = 0,923$.

Для обоснования состава и выбора структуры автономного ЭТК с ФЭУ разработана имитационная модель комплекса, реализованная в Matlab Simulink, позволяющая исследовать режимы работы ЭТК с учетом выявленных актуальных медианных и наилучших параметров ФЭП, представленных в таблице 1. Годовая выработка электроэнергии от автономной ФЭУ мощностью 43 кВт составила 54,7 МВт·ч/год (рисунок 8).

На основании результатов имитационного моделирования установлены зависимости образования и плавления ПО в НКТ нефтяной скважины от годовой выработки электроэнергии ФЭУ. Изменение толщины стенки парафина в НКТ нефтяной скважины в течение срока эксплуатации ЭТК с ФЭУ представлено на рисунке 9. По результатам моделирования оценено, что ПО, образованные в зимние месяцы эксплуатации ЭТК с ФЭУ, полностью расплавляются в течение летних месяцев, причем в зимний период толщина ПО на внутренней стенке НКТ не превышает допустимых значений (9 мм при диаметре НКТ 63 мм).

Таким образом, депарафинизация нефтяных скважин достигается за счет использования ФЭУ в качестве энергоэффективного автономного источника электроснабжения ЭТК, которая способна обеспечить предотвращение образования ПО в течение года без дополнительных источников энергии при условии компенсации стохастического характера прихода солнечного излучения за счет времени межочистного периода нефтяной скважины.

2. Обеспечение выбора достаточной номинальной мощности фотоэлектрической установки в составе автономного электротехнического комплекса для депарафинизации и повышения энергоэффективности работы нефтяных скважин должно осуществляться с учетом установленной зависимости времени простоя скважины от угла наклона фотоэлектрических панелей и влияния длины электрического греющего кабеля, размещенного внутри насосно-компрессорной трубы.

Для обоснования выбора достаточной номинальной мощности ФЭУ в составе автономного ЭТК для депарафинизации нефтяных скважин вводится коэффициент межочистного периода (МОП) $K_{\text{моп}}$ нефтяной скважины. Для проведения расчетов МОП определяется временем уменьшения площади поперечного сечения в НКТ на 50% и рассчитывается по формуле 4:

$$t_{50\%} = \frac{2,16\pi(d_0^2 - d_{50\%}^2)p_{\text{п}}l}{4G(1-z)B_0 \cdot [e^{0,0677 \cdot t_0} - e^{0,0677 \cdot t}]}, \quad (4)$$

где d_0 – внутренний диаметр НКТ, м; $d_{50\%}$ – минимальный диаметр пропускного сечения НКТ, м; $p_{\text{п}}$ – плотность парафиновых отложений; l – глубина начала отложения парафина, м; G – дебит скважины, т/сут; z – обводненность нефти, %; B_0 – коэффициент массообмена ПО между потоком нефти и стеной НКТ.

Коэффициент МОП $K_{\text{моп}}$ выражается в относительных единицах (о.е.), где за базисное значение принимается один календарный год (365 дней). Таким образом, достаточная номинальная мощность ФЭУ в составе ЭТК для депарафинизации нефтяных скважин обеспечивается при условии, если $K_{\text{моп}} \geq 1$.

Если $K_{\text{моп}} < 1$, то наступает период внепланового простоя нефтяной скважины. Установленная зависимость времени простоя от угла наклона ФЭП представлена на рисунке 10.

Из рисунка 10 видно, что при угле наклона ФЭП в диапазоне от 60 до 70 градусов, коэффициент МОП $K_{\text{моп}} = 1$. Однако при угле наклона ФЭП 60 градусов выработка электроэнергии ФЭУ на 10% превышает выработку при угле наклона ФЭП 70 градусов.

Таким образом, оптимальным углом наклона ФЭП является угол 60 градусов. Критерий оптимума определяется соотношением равномерного распределением выработки электроэнергии ФЭУ в течение года и исключением наступления периода внепланового простоя нефтяной скважины.

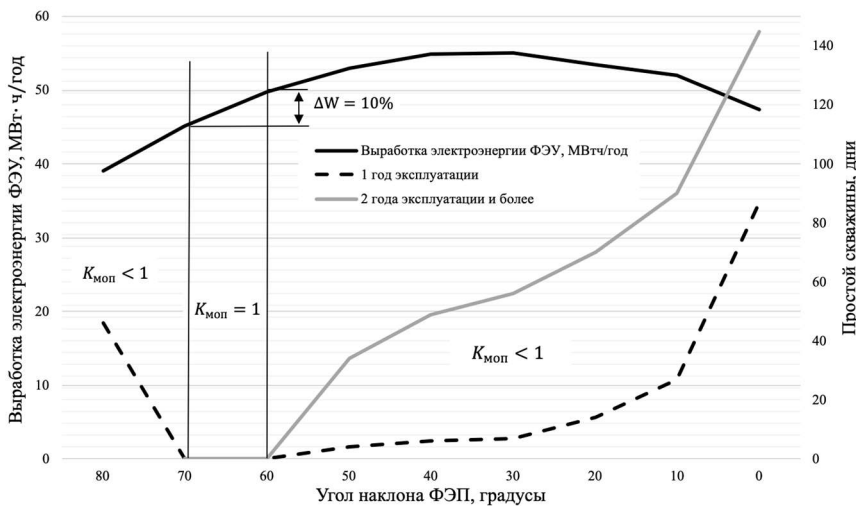


Рисунок 10 – Зависимость длительности внеплановых простоев нефтяной скважины от угла наклона фотозлектрических панелей

Выбор номинальной мощности автономной ФЭУ в составе ЭТК должен осуществляться с учетом длины электрического греющего кабеля. Зависимость коэффициента установленной мощности ФЭУ K_p от коэффициента длины электрического греющего кабеля K_l представлена на рисунке 11.

Для расчета K_p за базисное значение принята расчётная мощность ФЭУ 43 кВт. Для расчета K_l за базисное значение принята длина кабеля 490 м, соответствующая точке начала парафинообразования при концентрации парафина в нефти 5%. Доказано, что спуск электрического греющего кабеля ниже расчетной точки парафинообразования на 12,5% обеспечивает снижение установленной мощности ФЭУ более 2%. Установленная мощность ФЭУ при вариации эксплуатационных параметров нефтяной скважины представлена в таблице 2. Электрическая схема автономного ЭТК с ФЭУ представлена на рисунке 12. Срок окупаемости составил 6,8 лет. При применении ФЭУ в составе ЭТК объем эмиссии парниковых газов составляет менее 20–30 тонн CO₂ экв. в год с учетом жизненного цикла оборудования (в 3–6 раз ниже, чем при ис-

пользовании иных энергоисточников для депарафинизации нефтяных скважин).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается новое решение актуальной научной задачи повышения энергоэффективности работы нефтяных скважин за счет разработки автономного электротехнического комплекса с фотоэлектрической установкой для депарафинизации нефтяных скважин.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Проанализировано современное состояние проблемы электроснабжения нефтяных месторождений парафинистой нефти, удаленных от централизованной энергосистемы. Обоснована необходимость внедрения автономного ЭТК с ФЭУ для депарафинизации нефтяных скважин.

2. Установлены зависимости потребляемой электроэнергии для предотвращения образования ПО в нефтяных скважинах при фонтанном и механизированном способах добычи нефти от выбранных на основе факторного анализа характеристик эксплуатации скважины и физико-химических свойств нефти: коэффициента обводненности продукции, суточного дебита, диаметра НКТ, коэффициента теплопередачи между скважинной продукцией и горной породой.

3. Выполнено математическое моделирование стохастического изменения солнечного излучения. Получено уравнение учета коэффициента облачности для исследуемого региона. Отклонение расчетного солнечного излучения от действительных значений составило менее 10%, коэффициент корреляции $R = 0,923$. Установлены медианные параметры ФЭП, определены новые исходные данные для проведения имитационного моделирования. Обоснован выбор структуры и параметров ФЭУ в составе ЭТК. Для исследуемой нефти с концентрацией парафина 5% длина электрического греющего кабеля составила 490 м, установленная мощность ФЭУ составила 43 кВт.

4. Разработана имитационная модель автономного ЭТК с ФЭУ, преобразователем напряжения с МРРТ-алгоритмом и электрическим греющим кабелем и проведена оценка выработки электроэнергии с учетом актуальных исходных данных параметров ФЭП.

5. Установлены зависимости процесса депарафинизации нефтяной скважины от годовой выработки электроэнергии ФЭУ. Доказано, что толщина стенки парафина не превышает допустимых значений (9 мм при внутреннем диаметре НКТ 63 мм). Обоснована возможность использования ФЭУ для электропитания автономного ЭТК при компенсации стохастического характера солнечного излучения за счет времени МОП (30 дней для концентрации 5%). Установлены оптимальные параметры ЭТК с ФЭУ, при которых обеспечивается параметрическая достаточность ЭТК и отсутствует период простоя нефтяной скважины.

6. Экспериментальные исследования подтвердили адекватность математического и имитационного моделирования ЭТК с ФЭУ. Сходимость результатов составила 87%.

7. На основе методики выбора состава и параметров автономного ЭТК с ФЭУ для депарафинизации нефтяных скважин было выполнено ТЭО применения комплекса. Доказана экологическая (метод оценки жизненного цикла оборудования) и экономическая эффективность (метод дисконтированных денежных потоков) ЭТК с ФЭУ. Срок окупаемости составил 6,8 лет.

Перспективным направлением темы исследований является повышение эффективности использования автономного комплекса депарафинизации нефтяных скважин за счет применения разработанной методики обоснования структуры и состава ЭТК с ФЭУ на других месторождениях парафинистой нефти и поиска условий для эксплуатации комплекса, при которых возможно полное исключение образования ПО в НКТ нефтяных скважин.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Бельский, А.А. Моделирование электротехнического комплекса с питанием от ветро- и фотоэлектрической установки/ А.А. Бельский, А.В. Коптева, В.С. Добуш, В.В. Старшая // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 2, с.538-543. - 2020. (ВАК, № 1056 ред.28.02.2020).

2. Бельский, А.А. Анализ параметров фотоэлектрических панелей российского производства / А.А. Бельский, Я.Э. Шклярский, В.В. Старшая // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 12, с.379-390. - 2020. (ВАК, № 1095 ред.25.12.2020).

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Belsky, A.A. Analysis of specifications of solar photovoltaic panels/ A.A. Belsky, D.Y. Glukhanich, M.J. Carrizosa, V.V. Starshaia // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – №159. – 12239.

4. Shabalov, M.Y. The influence of technological changes in energy efficiency on the deterioration of infrastructure in the fuel and energy complex / Shabalov M.Y., Zhukovskiy Y.L., Buldysko A.D., Gil B., Starshaia V.V. // Energy Reports. — 2021. — №7. — pp. 2664–2680.

5. Zhukovskiy, Y.L. Fossil energy in the framework of sustainable development: Analysis of prospects and development of forecast scenarios /Zhukovskiy Y.L., Batueva D.E., Buldysko A.D., Gil B., Starshaia V.V. // Energies. – 2021. – №14(17). – 5268.

6. Shklyarskiy, Y.E. Autonomous complex for electro-thermal heating of oil wells fed by a photovoltaic installation/ Shklyarskiy Y.E., Starshaya V.V. // E3S Web of Conferences. – 2021. – №266. – 04006.

7. Koptev, V.Y. Information Support for the Process of Multiphase Flows Transportation Based on the Introduction of a Radioisotope Non-Separation Hydrocarbon Measuring System. / Koptev V.Y., Kopteva A.V., Starshaya V.V. // EIconRus 2020. – 2020. – №9039314. – pp. 674–679.

8. Kopteva, A.V. Improving the efficiency of petroleum transport systems by operative monitoring of oil flows and detection of illegal incuts/ Kopteva A.V., Starshaya V.V., Malarev V.I., Koptev V.Y. // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019. — 2020, — №1. — pp. 406–415.

Прочие публикации:

9. Шклярский, Я.Э. Автономный комплекс электропрогрева нефтяных скважин с использованием возобновляемых источников энергии / Я.Э. Шклярский, А.А. Бельский, В.В. Старшая // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – №1. – с.516-520.

10. Старшая, В.В. Предотвращение парафиновых отложений в нефтяных скважинах с использованием возобновляемых источников энергии / В.В. Старшая // Актуальные проблемы недропользования. Санкт-Петербург, 2021. С. 221-222.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

11. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. База данных фотоэлектрических панелей с номинальной (паспортной) мощностью от 100 Вт № 2020620747: заявл. 03.04.2022 г.: опубл: 29.04.2022/ Бельский А.А., Добуш В.С., Старшая В.В. // заявитель СПГУ. - 1 с.

12. Заявка на свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета параметров электротехнического комплекса для прогрева нефтяных скважин с греющим кабелем. №2023663016. заявл.: 23.05.2023 / Шклярский Я.Э., Бельский А.А., Старшая В.В. // заявитель СПГУ. - 1 с.

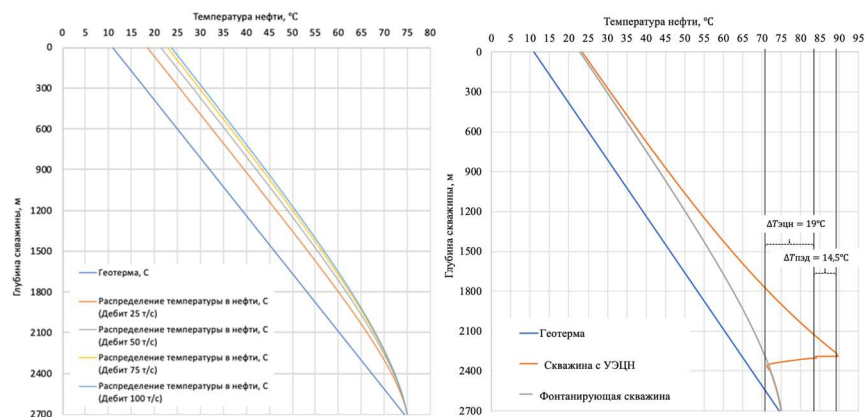


Рисунок 2 – Зависимость температуры нефти от глубины пласта:
 а) для скважины с фонтанным способом добычи при различных дебитах
 б) для скважины с ЭЦН при дебите 75 т/сут

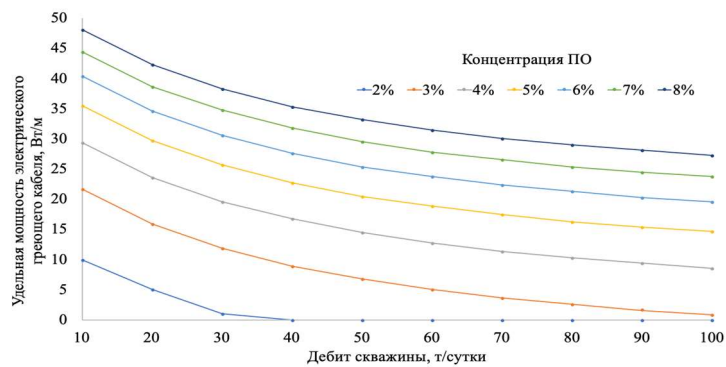


Рисунок 3 – Зависимость удельной мощности электрического греющего кабеля от дебита нефтяной скважины и концентрации ПО

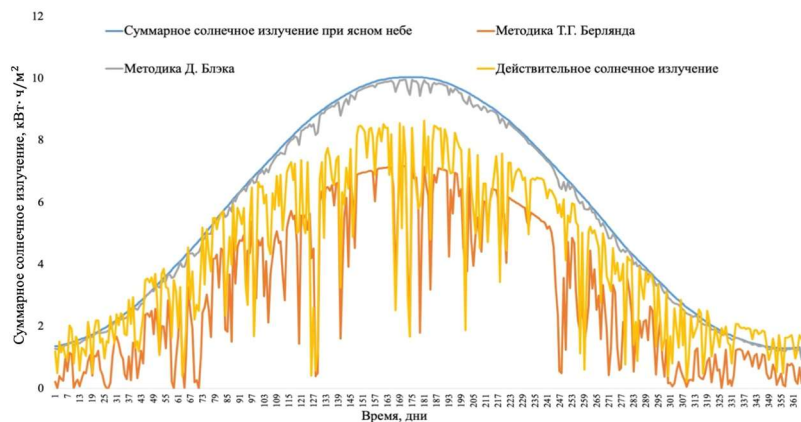


Рисунок 4 – Результаты моделирования изменения солнечного излучения с учетом облачности (методика Т.Г. Берлянда, методика Д. Блэка)

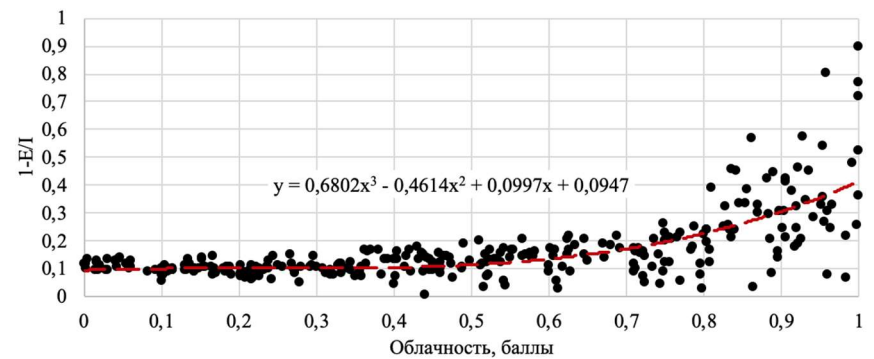


Рисунок 5 – Регрессионное соотношение действительного солнечного излучения к расчетному солнечному излучению при ясном небе и коэффициента облачности

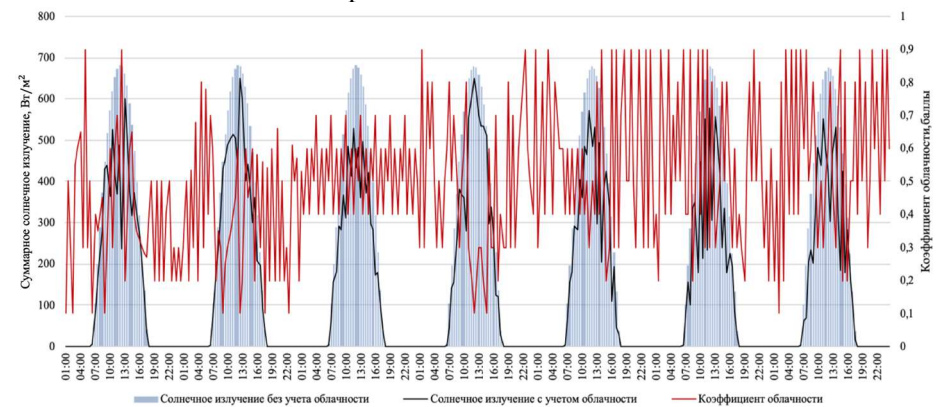


Рисунок 6 – Результаты математического моделирования стохастического изменения солнечного излучения в течение 7 дней с 16-го по 22-е ноября

Таблица 1 – Медианные и наилучшие параметры ФЭП

Параметр	Медианные паспортные параметры ФЭП*	Наилучшие паспортные параметры ФЭП*
Максимальная мощность, Вт	261,55	380,24
Количество ячеек, шт	60	120
Напряжение холостого хода, В	40,42	44,3
Ток короткого замыкания, А	8,43	10,61
Напряжение максимальной мощности, В	32,9	38,1
Ток максимальной мощности, А	7,95	9,98
Температурный коэффициент Uх.х., %/°C	-0,34	-0,23
Температурный коэффициент Iк.з., %/°C	0,05	0,059

*среди рассмотренных в Базе Данных 972 ФЭП

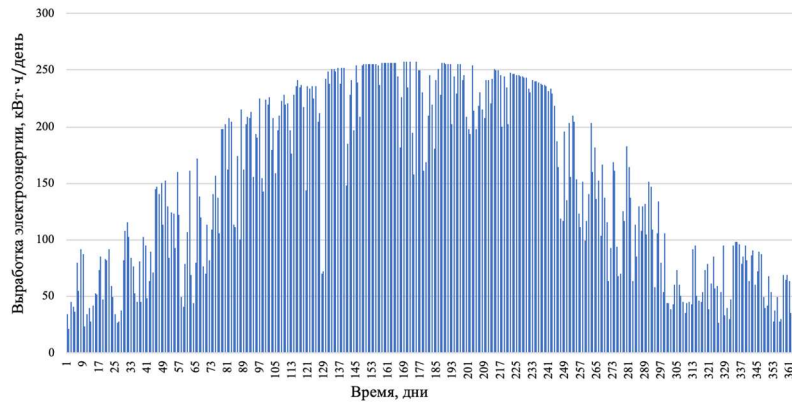


Рисунок 8 – Годовая среднесуточная выработка электрической энергии от автономной ФЭУ

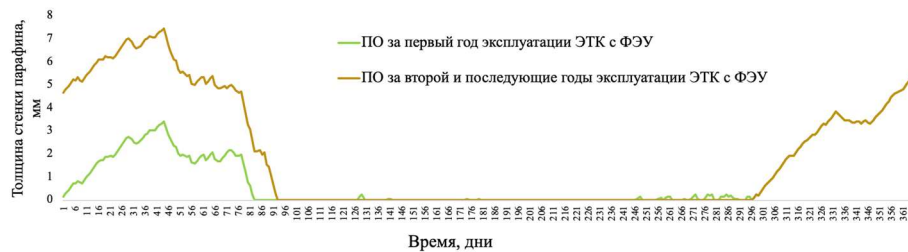


Рисунок 9 – Изменение толщины стенки парафина в НКТ нефтяной скважины в течение года

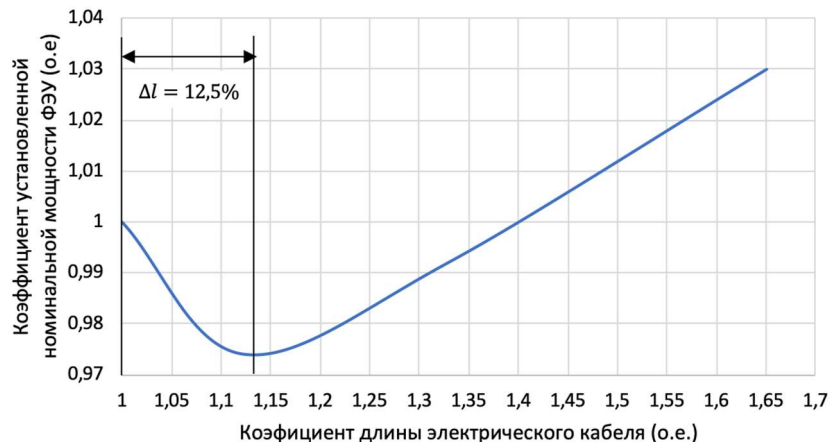


Рисунок 11 - Зависимость установленной мощности ФЭУ от длины электрического греющего кабеля

Таблица 2 – Установленная мощность ФЭУ при вариации параметров эксплуатации нефтяной скважины

Параметр	Значение			
Дебит скважины, т/сут	25	50	75	100
Внутренний диаметр НКТ, мм	63			
Обводненность, %	10			
Глубина скважины, м	2700			
Коэффициента теплопередачи, Вт/(м ² ·°С)	8,9	12,9	14,7	17,9
Температура нефти у устья скважины до подогрева, °С	19,2	22,7	24	25,8
Концентрация ПО, %	5			
Температура образования ПО, °С	35,22			
Длина электрического греющего кабеля, м	700	550	490	430
Потребляемая электроэнергия, кВт·ч/день	318,4	195,5	156,5	115
Установленная мощность ФЭУ, кВт	88,3	54,2	43,4	31,9

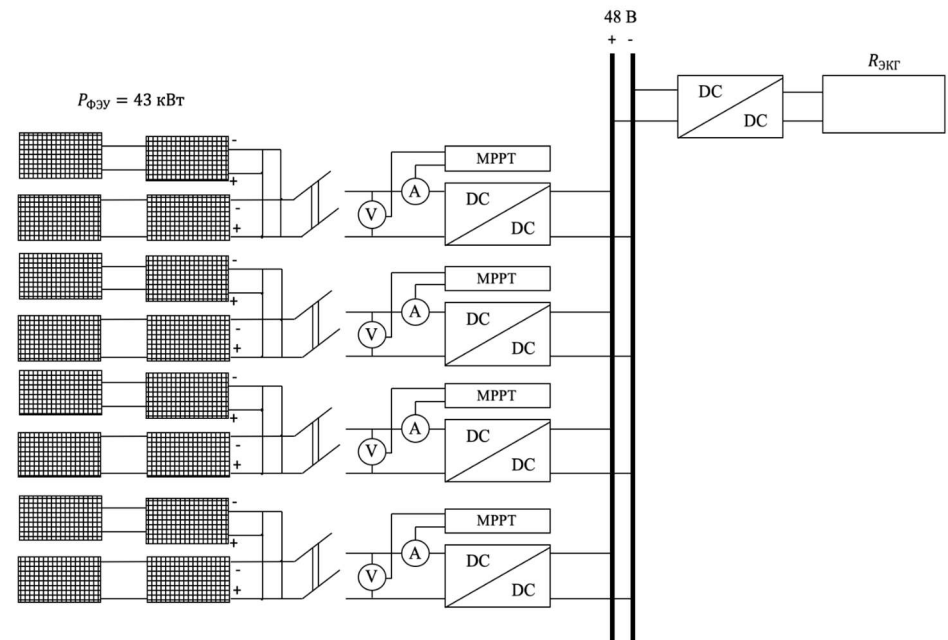


Рисунок 12 – Электрическая схема автономного ЭТК с ФЭУ для депарафинизации нефтяных скважин