



ISSN: 2658–5782

Номер 2

2024

# МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

[mfs.uimech.org](https://mfs.uimech.org)





<http://mfs.uimech.org/mfs2024.2.012>

DOI: 10.21662/mfs2024.2.012

УДК / UDC: 621.865.8

Получена / Received: 04.07.2024

Принята / Accepted: 12.08.2024



## Статистический анализ дефектов УЭЦН, выявленных при роботизации контрольных операций

И.И. Гиндуллин

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

E-mail: [dennyrus007@gmail.com](mailto:dennyrus007@gmail.com)

В настоящей статье представлены перспективы использования статистического анализа дефектов деталей установок электроцентробежных насосов (УЭЦН), которые выявляются в ходе выполнения операций очистки, оценки и дефектоскопии в специализированном роботизированном автономном модуле диагностики. Проведен комплексный статистический анализ с использованием методов описательной статистики, регрессионного анализа, анализа временных рядов и многомерных методов на основе репрезентативной базы данных об отказах УЭЦН. Анализ результатов регрессионного анализа выявил значительное влияние температуры и давления на вероятность возникновения дефектов деталей УЭЦН. С использованием полученного результата и данных о режимах работы реализован прототип экспертно-советующей системы, генерирующей рекомендации по оптимизации режимов чистки, оценки и дефектоскопии, указывающей на наиболее вероятные типы дефектов. Внедрение предложенных рекомендаций обеспечивает сокращение временных и стоимостных затрат на подготовительные операции, массогабаритный контроль, повышение точности дефектоскопии и, как следствие, рост надежности функционирования УЭЦН, снижение операционных издержек нефтегазодобывающих предприятий. Проведенное исследование демонстрирует высокий потенциал для применения современных статистических методов решения практических задач в нефтегазовой промышленности.

**Ключевые слова:** установки электроцентробежных насосов, дефекты деталей, статистический анализ, регрессионный анализ, дефектоскопия, нефтегазовая промышленность

## Statistical analysis of ESP defects detected during the robotization of control operations

I.I. Gindullin

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

E-mail: [dennyrus007@gmail.com](mailto:dennyrus007@gmail.com)

This article presents the prospects for using statistical analysis of defects in parts of electric centrifugal pumps (ECP) installations, which are detected during cleaning, evaluation and flaw detection operations in a specialized robotic autonomous diagnostic module. A comprehensive statistical analysis was carried out using methods of descriptive statistics, regression analysis, time series analysis and multidimensional methods based on a representative database of ESP failures. The analysis of the regression analysis results revealed a significant influence of temperature and pressure on the probability of defects in the ESP parts. Using the obtained result and data on operating modes, a prototype of an expert-advising system has been implemented that generates recommendations for optimizing cleaning, evaluation and flaw detection modes, indicating the most likely types of defects. The implementation of the proposed recommendations ensures a reduction in time and cost costs for preparatory operations, weight and dimensional control, increased accuracy of flaw detection and, as a result, increased reliability of the operation of the ESP, reduced operating costs of oil and gas producing enterprises. The conducted research demonstrates a high potential for the application of modern statistical methods for solving practical problems in the oil and gas industry.

**Keywords:** electrical submersible pump units, component defects, statistical analysis, regression analysis, defectoscopy, oil and gas industry

### 1. Введение

Установки электроцентробежных насосов (УЭЦН) являются неотъемлемой частью системы добычи нефти в современной нефтегазовой промышленности, поэтому актуальной проблемой является обеспечение бес-

перебойной работы скважинного оборудования, в том числе и за счет организации своевременного ремонта на месте. Эксплуатационная надежность оборудования напрямую зависит от качества составляющих его деталей, сборочного процесса и режимов работы. В процессе функционирования УЭЦН большая часть его де-

талей подвергаются воздействию агрессивных сред и значительным механическим нагрузкам, что приводит к ускоренному развитию процессов износа и проявлению различных видов дефектов, которые могут спровоцировать преждевременный отказ системы.

Подготовительным этапом к проведению дефектоскопии деталей является их очистка (промыть) с целью удаления загрязнений, препятствующих определению дефектов или оказывающих негативное влияние на качество контроля. Однако данные операции зачастую характеризуются высокими трудоемкостью и временными затратами, что снижает общую производительность процесса подготовки.

После завершения операций очистки осуществляются визуальный и инструментальный контроль для поиска и классификации дефектов, выполняется составление карты с указанием координат и размеров выявленных отклонений формы, нарушений поверхностей и пр. согласно дефектной ведомости. Традиционные методы контроля обладают рядом недостатков, такими как субъективность оценки, вариабельная продолжительность процесса, а также потенциально невысокая точность при обработке больших объемов изделий.

В связи с вышеизложенным для интенсификации процесса, повышения эффективности, качества и оптимизации операций очистки, промывки и дефектоскопии деталей УЭЦН предлагается не только провести автоматизацию контрольных операций за счет использования промышленного робота, а также разработать методику применения статистических методов анализа полученной и входной информации. Использование статистического аппарата позволит оптимизировать режимы очистки и промывки деталей, поступающих в комплекс, а также реализовать гибкие, адаптивные алгоритмы детектирования и классификации дефектов с высокой степенью точности.

Корректное использование статистических методов обеспечит значительное сокращение временных затрат на подготовительные операции при поступлении деталей на контроль и повысит качество их дефектоскопии, гарантируя быстрое выявление дефектных элементов. Это, в свою очередь, позволит предупредить отказы оборудования, минимизировать издержки, связанные с ремонтом и простоями, а также повысить уровень промышленной безопасности технологических процессов в нефтегазовой отрасли.

Таким образом, проведение статистического анализа для оптимизации процессов подготовки и контроля деталей УЭЦН является актуальной задачей, решение которой имеет важное научно-практическое значение для повышения эффективности и надежности функционирования промышленного оборудования.

## 2. Использование статистического анализа для выявления причин отказов

Методы статистического анализа долгое время находят применение в нефтегазовой отрасли для решения различных задач, связанных с повышением эффектив-

ности добычи, транспортировки и переработки углеводородов. Так, в работе [1] представлен обзор методов, используемых для оценки надежности нефтегазового оборудования и позволяющих выполнить анализ выживаемости или вида распределения наработки на отказ, регрессионный анализ и анализ временных рядов. Авторы подчеркивают важность применения статистических методов для поиска различных факторов или их комбинаций, влияющих на надежность оборудования, и служащих информационным базисом при разработке эффективных мер по предотвращению отказов.

В работе [2] рассмотрено применение анализа Парето для идентификации наиболее значимых факторов, влияющих на отказы нефтегазового оборудования. Авторы демонстрируют эффективность предлагаемого метода на примере анализа отказов трубопроводов, что позволило выявить основные причины отказов и сосредоточить усилия на их устранении.

Применение методов статистического анализа открывает новые возможности для корректного и адекватного учета причин отказов оборудования, а в нашем случае это самое массово применяемое на месторождениях — УЭЦН [3]. По сравнению с традиционными подходами для анализа информации, базирующимися на основе эмпирического опыта, статистический анализ обладает рядом существенных преимуществ:

1. Объективность и обоснованность выводов за счет использования проверенных (рекомендуемых) математических методов обработки больших массивов данных, не зависящих от субъективного мнения экспертов.
2. Возможность комплексного учета влияния множества факторов: условий эксплуатации, режимов работы, конструктивных особенностей и т.д.
3. Выявление скрытых взаимосвязей и зависимостей между факторами и показателями надежности, которые сложно обнаружить при использовании традиционных методов.
4. Построение количественных моделей, позволяющих прогнозировать вероятность отказов и остаточный ресурс в зависимости от наиболее значимых переменных [3].
5. Ранжирование причин отказов по степени их деструктивного воздействия, что дает основу для выработки приоритетных мер по повышению надежности.
6. Возможность выявления периодических колебаний и (или) сезонных изменений в частоте отказов.

Таким образом, методы статистического анализа могут стать мощным инструментом для исследования причин отказов УЭЦН, позволяющим перейти от качественных экспертных оценок к количественно обоснованным выводам, полученным на основе обработки объективных данных. Предлагаемый подход открывает

новые перспективы для роста эффективности нефтедобычи за счет повышения надежности используемого оборудования.

Анализ видов и причин отказов УЭЦН является в современных условиях необходимой задачей, поскольку позволяет разработать превентивные меры для повышения надежности этого вида оборудования. В исследовании [3] проводится комплексный анализ причин основных видов отказов УЭЦН, таких как коррозия, износ, засорение и механические повреждения деталей. Авторы выявили, что наиболее распространенными причинами являются коррозия корпусных деталей, износ рабочих колес насоса и засорение рабочих ступеней механическими примесями.

В работе [4] изучается влияние режимов работы УЭЦН, в частности, объемных расходов подачи и создаваемого напора, на их надежность. Авторы обнаружили, что отклонение от оптимальных режимов работы может привести к повышенному износу деталей насоса и, как следствие, к поломкам оборудования.

Условия эксплуатации скважин, такие как обводненность, температура пластовой жидкости, содержание сероводорода и механических примесей оказывают значительное влияние на надежность УЭЦН. В работе [5] рассматривается воздействие высокой обводненности на коррозию и износ деталей УЭЦН и показано, что повышенная обводненность может ускорить процессы коррозии и способствовать более интенсивному износу рабочих колес насоса.

Авторы другого исследования [6] анализируют влияние высокого содержания сероводорода на повреждение подшипников электродвигателя и коррозию корпусных деталей УЭЦН. Результаты свидетельствуют о необходимости применения специальных коррозионно-стойких материалов и регулярного мониторинга состояния подшипников в условиях высокого содержания сероводорода.

### 3. Постановка задачи при разработке робототехнического модуля

Основной целью настоящего исследования является проведение статистического анализа дефектов деталей УЭЦН для разработки рекомендаций по интенсификации и повышению эффективности процессов их очистки, промывки с последующей дефектоскопией.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующего комплекса взаимосвязанных задач:

1. Анализ существующих методов статистического исследования дефектов в применении к объектам нефтегазовой промышленности с целью определения наиболее перспективных подходов.
2. Формирование репрезентативной базы данных о дефектах деталей УЭЦН, включающей информацию о видах, локализации, характеристиках дефектов, а также условиях эксплуатации оборудования.

3. Проведение обоснованного выбора статистических методов и программных средств для анализа сформированной базы данных.
4. Проведение статистического исследования дефектов деталей УЭЦН с использованием методов описательной статистики, кластерного анализа, многомерного шкалирования и других релевантных методов.
5. Выявление закономерностей возникновения и взаимосвязей различных видов дефектов на основе результатов проведенного статистического анализа.
6. Разработка рекомендаций по оптимизации режимов чистки и промывки деталей с учетом выявленных закономерностей для повышения производительности данных операций.
7. Предложение усовершенствованной системы дефектоскопии деталей УЭЦН с использованием методов автоматической классификации дефектов на основе статистического анализа для повышения скорости и качества контроля.
8. Оценка потенциальных экономических эффектов от внедрения разработанных рекомендаций по интенсификации процессов подготовки и контроля деталей УЭЦН.

Решение поставленных задач позволит получить научно-обоснованные результаты, имеющие важное прикладное значение для повышения производительности, качества и безопасности технологических процессов в нефтегазовой отрасли.

### 4. Методология исследования. Источники и сбор данных об отказах УЭЦН, выбор метода

В качестве источников данных для проведения статистического анализа загрязнений и дефектов деталей УЭЦН были использованы отчеты о ремонтах и описания отказов скважинного оборудования, предоставленные нефтегазодобывающими компаниями и находящиеся в открытом доступе. Собранные данные охватывали информацию об отказах УЭЦН на различных месторождениях с разнообразными геолого-физическими условиями эксплуатации [7–9]. В отчетах содержались сведения о видах отказов, наработке на отказ, условиях эксплуатации скважин (обводненность, содержание сероводорода, температура пластовой жидкости, содержание механических примесей) и режимах работы УЭЦН (подача, напор). Собранные данные были обработаны, систематизированы и подготовлены для дальнейшего статистического анализа.

Основные причины отказов отражены в табл. 1 и 2 согласно работам [10–14].

Далее приведем описание областей применения, решаемых задач и использованных в исследовании методов статистического анализа.

Таблица 1. Причины разрушения УЭЦН по группам типоразмеров, %

Причины	Типоразмер УЭЦН		
	ВННПИ5-25	ВННПИ5-(59..125)	ВННПИ5А-(124..240)
Причины, связанные с нарушением технологии эксплуатации скважин			
Геолого-технические мероприятия	31	34	33
Солеотложения	22	8	4
Засорение механическими примесями	11	8	8
Снижение динамического уровня	12	17	
Вина нефтегазодобывающего управления (НГДУ)	5		8
Некачественный вывод на режим			
Некачественный подбор УЭЦН	0,2		
Коррозия	1,41		
Бесконтрольная эксплуатация	0,2		
Причины, связанные с нарушением технологии подземного ремонта скважин (ПРС)			
Негерметичность НКТ	5	8	
Механические повреждения кабеля	0,4		4
Нарушение технологии спуско-подъемной операции (СПО)		8	
Полет по НКТ	0,2		4
Некачественная подготовка скважины	0,4		
Конструктивная надежность УЭЦН			
Отказ ЭЦН			13
Отказ погружного электродвигателя (ПЭД)			
Отказ гидрозащиты			
Отказ кабельной линии			
Некачественный ремонт	3		18

Таблица 2. Список возможных дефектов деталей УЭЦН

Специфика месторождения	Ожидаемая неисправность	Вероятность, %
Высокая обводненность	Износ рабочих колес насоса	5,0
	Коррозия корпусных деталей	4,4
	Засорение рабочих ступеней механическими примесями	5,6
	Отложения солей на деталях	5,0
Высокое содержание сероводорода	Повреждение подшипников электродвигателя	7,0
	Коррозия корпусных деталей	8,0
	Разрушение рабочих лопаток	8,0
Высокая температура пластовой жидкости	Повреждение уплотнений вала	7,0
	Выход из строя электродвигателя	5,0
	Трещины в корпусе насоса	7,0
Высокое содержание механических примесей	Износ рабочих колес насоса	8,0
	Засорение рабочих ступеней механическими примесями	5,0
	Разрушение рабочих лопаток	8,0
Высокий газовый фактор	Обрыв кабельной линии	12,0
	Выход из строя электродвигателя	5,0

Методы описательной статистики позволяют получить общее представление о массиве данных по отказам УЭЦН, рассчитать основные статистические показатели и визуализировать распределение дефектов. К таким методам относятся:

- Расчет среднего, медианы, моды, квартилей для количественных переменных (например, количества отказов за период).
- Построение гистограмм, диаграмм размаха для визуализации распределения дефектов по типам, деталям, условиям эксплуатации.
- Расчет частот (процентных долей) для качественных переменных (например, доля коррозионных повреждений).

Основное преимущество приведенных выше методов заключается в наглядности представления данных, поэтому они довольно часто используются в нефтегазовой отрасли. Но им также присущ существенный недостаток — они не позволяют выявить какие-либо связи между переменными и факторами. Поэтому предлагается использовать регрессионный анализ, так как методы регрессионного анализа помогут установить зависимости между факторами (условиями эксплуатации УЭЦН) и вероятностью возникновения различных видов дефектов деталей. Так линейная регрессия позволит построить модели зависимости вероятности дефекта от одного или нескольких факторов (состав флюида, температура, давление и т.д.). А логическая регрессия может быть применена в более простых задачах для выявления бинарно зависимой переменной (дефект есть/нет).

Преимущества регрессионного анализа: количественная оценка влияния факторов, возможность прогнозирования. Недостатки: требуются большие объемы данных, необходимо выполнение целого ряда предположений.

Использование другого метода, а именно, анализа временных рядов позволит исследовать в динамике изменения частоты возникновения дефектов во времени, выявлять устойчивые тренды и сезонные компоненты. Для этого применяются следующие инструменты:

1. Разложение временного ряда на составляющие (тренд, сезонность, остаток) с помощью сглаживающих процедур.
2. Прогнозирование будущих значений временного ряда с использованием различных методов (экспоненциальное сглаживание, ARIMA и др.)

Достоинства метода: эффективность выявления периодичности в анализируемых данных. Недостатки: не учитывает влияние факторов, требуется большой объем наблюдений.

Контрольные карты применяются как инструмент контроля качества процессов, что позволяет отслеживать стабильность частот возникновения дефектов, своевременно фиксировать нежелательные выбросы.

Так карты Шухарта необходимы для получения количественных данных — числа дефектов за определенный период. Может быть построена карта долей для качественных данных, например, доля дефектных деталей. Преимущества данного метода: эффективность как инструмента текущего контроля. Недостатки: не способен выявить причины нестабильности.

Кластерный анализ позволяет разбить совокупность объектов (отказов УЭЦН) на группы (кластеры) по признакам сходства. Наиболее известные виды кластерного анализа: иерархические методы (агломеративные, дивизимные); метод  $k$ -средних; метод EM. Достоинства: способен выделить типичные сочетания дефектов, характерные для разных условий эксплуатации. Недостатки: необъективность выбора мер сходства, сложность интерпретации кластеров.

Многомерные методы анализа, к которым относятся как факторный анализ, так и анализ главных компонент. Их корректное использование позволяет сократить размерность анализируемых данных и эффективно выявить даже скрытые факторы, влияющие на возникновение дефектов. Преимущества: позволяют учитывать комплексное взаимодействие множества переменных. Недостатки: сложность интерпретации результатов, большие требования к объему данных.

Так как основная задача исследования состояла в оценке перспективности применения статистических методов для решения задачи повышения эффективности роботизированного модуля дефектовки, то был выбран метод линейной регрессии. Его простота в реализации позволила эффективно и адекватно решить поставленную задачу — количественно оценить влияние различных факторов (состав флюида, температура, давление и т.д.) на вероятность возникновения отдельных видов дефектов деталей УЭЦН. При наличии больших массивов накопленных данных по отказам УЭЦН с его помощью можно построить качественные регрессионные модели с высокой степенью достоверности. К тому же, при необходимости, дополнительно могут использоваться и другие методы, например, метод описательной статистики для визуализации данных или кластерный анализ для выявления типичных комбинаций дефектов.

## 5. Результаты исследований применимости выбранного метода

Построена компьютерная модель для определения зависимости частоты проявления дефектов в деталях УЭЦН от различных факторов эксплуатации [15–17], базирующаяся на линейной регрессии. Основными независимыми переменными, включенными в модель, выбраны состав флюида, температура и давление. Для оценки качества модели были рассчитаны следующие метрики:

- среднеквадратичная ошибка (Mean Squared Error, MSE): 0.50 ;
- коэффициент детерминации ( $R^2$ ): 0.82;

- скорректированный коэффициент детерминации (Adjusted  $R^2$ ): 0.64.

Количество наблюдений в исследовании было ограничено 10-ю измерениями. Это относительно небольшой объем данных, что может влиять на точность и надежность модели, но для поставленной задачи по качественной оценке этого вполне достаточно.

Результаты оценки модели представлены на рис. 1.

Результаты оценки модели линейной регрессии показали высокую степень объяснительной способности ( $R^2 = 0.82$ ), что указывает на значительное влияние рассматриваемых факторов на вероятность возникновения дефектов. Тем не менее, относительно невысокое значение скорректированного  $R^2$  (0.64) и небольшое количество наблюдений (10) предполагают необходимость увеличения объема данных для повышения надежности выводов. Коэффициенты модели также указывают на значительное влияние температуры и давления на вероятность дефектов, что может служить основанием для проведения дальнейших исследований для выбора эффективных мер по оптимизации условий эксплуатации УЭЦН с целью уменьшения частоты возникновения дефектов.

Результаты исследования демонстрируют потенциальные и перспективные направления улучшения модели, включая сбор большего объема данных и разработку алгоритмов проверки выполнения предпосылок линейной регрессии.

Построенные регрессионные модели будут использоваться для прогнозирования и оптимизации программ ремонтно-профилактических мероприятий.

## 6. Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало актуальность и перспективность применения методов статистического анализа для выявления причин отказов УЭЦН и оптимизации процессов их подготовки, ремонта и контроля.

На основе собранной базы данных, сформированной из отчетов о ремонтах и истории отказов скважинного оборудования, был проведен комплексный статистический анализ с использованием методов описательной статистики, регрессионного анализа, анализа временных рядов и многомерных методов.

Результаты регрессионного анализа с применением модели линейной регрессии выявили значительное влияние таких факторов, как температура и давление, на вероятность возникновения различных видов дефектов деталей УЭЦН. Это указывает на необходимость дальнейшей оптимизации условий эксплуатации оборудования для повышения его надежности.

Полученные в ходе исследования данные и выводы позволили сформулировать рекомендации по совершенствованию режимов чистки, промывки и дефектоскопии деталей УЭЦН с целью интенсификации этих процессов, повышения их производительности и качества.

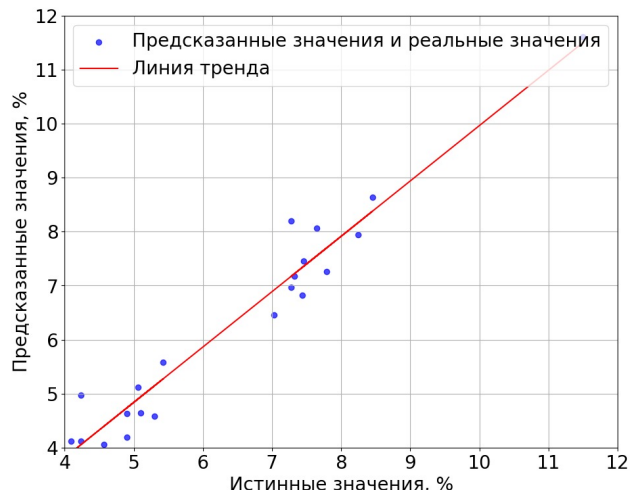


Рис. 1. Результаты моделирования отказа УЭЦН

Внедрение предложенных рекомендаций, базирующихся на результатах статистического анализа, будет способствовать сокращению временных и трудовых затрат на подготовку деталей к контролю, повышению точности и эффективности дефектоскопии, что в конечном итоге обеспечит рост надежности функционирования УЭЦН и снижение издержек нефтегазодобывающих предприятий.

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует высокий потенциал применения современных статистических методов для решения практических задач в области нефтегазовой промышленности и открывает перспективы для дальнейших научных разработок в данном направлении.

## Список литературы / References

- [1] Эконометрика: учебник для вузов / И.И. Елисеева [и др.]; под редакцией И.И. Елисеевой. Москва: Издательство Юрайт, 2024. 449 с. [Econometrics: textbook for universities] *Ekonometrika: uchebnik dlya vuzov* (ed. I.I. Eliseeva). Moscow: Izdatel'stvo Yurajt, 2024. P. 449 (in Russian). <https://urait.ru/bcode/535449>
- [2] Орлов А.И. Прикладная статистика. М.: Экзамен, 2006. 671 с. Orlov A.I. [Applied Statistics] *Prikladnaya statistika*. Moscow: Ekzamen, 2006. P. 671 (in Russian).
- [3] Ивановский В.Н., Пекин С.С., Сабиров А.А. Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти. М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. 256 с. Ivanovskij V.N., Pekin S.S., Sabirov A.A. [Installations of submersible centrifugal pumps for oil production] *Ustanovki pogruzhnyh centroběžnyh nasosov dlya dobychi nefi*. Moscow: GUP Izd-vo «Neft' i gaz» RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina, 2002. P. 256 (in Russian).
- [4] Ляпков П.Д. Подбор установки погружного центробежного насоса к скважине. М.: МИНГ, 1987. 71 с. Lyapkov P.D. [Selection of installation of a submersible centrifugal pump for a well] *Podbor ustanovki pogruzhnogo centroběžnogo nasosa k skvazhine*. Moscow: MING, 1987. P. 71 (in Russian).
- [5] Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти: Учебное пособие для вузов. М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 816 с. Mishchenko I.T. [Well oil production: A textbook for universities] *Skvazhinnaya dobycha nefi: Uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow: FGUP Izd-vo «Neft' i gaz» RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina, 2003. P. 816 (in Russian).
- [6] Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Сабиров А.А. и др. Оборудование для добычи нефти и газа: В 2 т. М.: ВНИИОЭНГ, 2001. Т. 1. 304 с.

- Ivanovskij V.N., Darishchev V.I., Sabirov A.A. et al. [Equipment for oil and gas production] *Oborudovanie dlya dobychi nefiti i gaza*. M.: VNIIOENG, 2001. Vol. 1. P. 304 (in Russian).
- [7] Мухаметшин В.Ш. Моделирование процесса нефтеизвлечения с использованием опыта разработки месторождений, находящихся длительное время в эксплуатации // Нефтегазовое дело. 2011. Т. 9, № 4. С. 47–50.  
Mukhametshin V.Sh. Model for ecast of the oil recovery process using development experience of old-run fields. *Petroleum engineering*. 2011. Vol. 9, no. 4. Pp. 47–50 (in Russian).  
EDN: PANEU
- [8] Галлямов М.Н., Рахимкулов Р.Ш. Повышение эффективности эксплуатации нефтяных скважин на поздней стадии разработки месторождений. Москва: Недра, 1978. 207 с.  
Gallyamov M.N., Rahimkulov R.Sh. [Increasing the efficiency of oil well operation at a late stage of field development] *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii neftyanykh skvazhin na pozdnej stadii razrabotki mestorozhdenij*. Moscow: Nedra, 1978. P. 207 (in Russian).
- [9] Серебренников А.В., Петрикевич П.А., Тороп О.В., Фролов В.В. Эксплуатация механизированного фонда скважин в осложненных условиях // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2017. № 7(67). С. 86–97.  
Serebrennikov A.V., Petrikevich P.A., Torop O.V., Frolov V.V. [Operation of mechanized well stock in difficult conditions] *Ekspluatatsiya mekhanizirovannogo fonda skvazhin v oslozhnennykh usloviyah*. Delovoj zhurnal Neftegaz.RU. 2017. NO. 7(67). Pp. 86–97 (in Russian).  
EDN: ZRZUHP
- [10] Ибрагимов Н.Г., Хафизов А.Р., Шайдаков В.В. Осложнения в нефтедобыче. Уфа: Монография, 2003. 302 с.  
Ibragimov N.G., Hafizov A.R., Shajdakov V.V. [Complications in oil production] *Oslozhneniya v neftedobyche*. Ufa: Monografiya, 2003. P. 302 (in Russian).
- [11] Антониади Д.Г., Гарушев А.Р., Ишханов В.Г. Настольная книга по термическим методам добычи нефти. Краснодар: Советская Кубань, 2000. 461 с.  
Antoniadi D.G., Garushev A.R., Ishkhanov V.G. [Handbook on thermal methods of oil production] *Nastol'naya kniga po termicheskim metodam dobychi nefiti*. Krasnodar: Sovetskaya Kuban', 2000. P. 461 (in Russian).
- [12] 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(554). С. 28–35.  
Solovyev I.G., Konstantinov I.V., Govorkov D.A. Optimization of equipment parameters and a well operational mode with esp under conditions of complications. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*. 2019. No. 9(554). Pp. 28–35 (in Russian).  
DOI: 10.33285/0132-2222-2019-9(554)-28-35
- [13] Сабиров А.А., Деговцов А.В., Кузнецов И.В., Алиев Ш.А., Мазеин И.И., Меркушев С.В., Красноборов Д.Н. Прогнозирование наработки на отказ, выбор исполнения и оптимизация закупок установок электроцентробежных насосов для осложненного фонда скважин // Территория Нефтегаз. 2019. № 7–8. С. 44–48.  
Sabirov A.A., Degovtsov A.V., Kuznetsov I.V., Aliev Sh.A., Mazein I.I., Merkushev S.V., Krasnoborov D.N. Forecasting the operating time to failure, selection of design and optimization of procurement of electric centrifugal pump installations for complicated wells stock. *Territorija neftegaz*. 2019. No. 7–8. Pp. 44–48 (in Russian).  
EDN: IMAHPU
- [14] Бахтизин Р.Н., Уразаков К.Р., Латыпов Б.М., Ишмухаметов Б.Х. Утечки жидкости в штанговом насосе с регулируемым ходом плунжера // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14, № 4. С. 33–39.  
Bachtizin R.N., Urazakov K.R., Latypov B.M., Ishmukhametov B.H. Fluid leakage in a sucker-rod pump with regular micro-relief at surface of the plunger. *Petroleum engineering*. 2016. Vol. 14, no. 4. Pp. 33–39 (in Russian).  
EDN: YNBDMV
- [15] Шангараева Л.А., Максютин А.В., Султанова Д.А. Способы предотвращения слеотложения при разработке и эксплуатации залежей нефти // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 336.  
Shangaraeva L.A., Maksyutin A.V., Sultanova D.A. Methods to prevent scale during the development and exploitation of oil fields. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. No. 1-1. P. 336 (in Russian).  
EDN: VIDYCV
- [16] Колтырин А.Н. Разработка методики и оценка эффективности работоспособности вероятностно-статистических моделей для прогнозирования прироста дебита нефти в скважинах после проведения гидроразрыва пласта // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2022. № 4(364). С. 49–58.  
Koltyrin A.N. Development of the method and estimation of applicability and efficiency of probability-statistical models for forecasting oil production rate increase in wells after hydraulic fracturing. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2022. No. 4(364). Pp. 49–58 (in Russian).  
DOI: 10.33285/2413-5011-2022-4(364)-49-58
- [17] Кожин А.Г., Соловьев И.Г. Анализ факторов, влияющих на износ погружного электрооборудования // Вестник кибернетики. 2006. № 2. С. 45–52.  
Kozhyn A.G., Soloviev I.G. Analysis of the factors influencing deterioration of submersible electric equipment. *Proceedings in Cybernetics*. 2006. No. 2. Pp. 45–52 (in Russian).  
EDN: JWBSF

## Сведения об авторах / Information about the Authors

**Ильдар Ирекович Гиндуллин**

Уфимский нефтяной государственный технический университет, Уфа

**Ildar Irekovich Gindullin**

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

[dennyrus007@gmail.com](mailto:dennyrus007@gmail.com)

ORCID: 0009-0005-6426-2696