

На правах рукописи



**ЧЕРНЫХ ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА**

---

**РАЗРАБОТКА  
МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА ЗАБОЙНОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ  
ПРОМЫСЛОВО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН**

Специальность 25.00.10 – Геофизика,  
геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат  
диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь, 2018

Работа выполнена на кафедре геофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ) Министерства образования и науки Российской Федерации и на кафедре «Геология нефти и газа» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) Министерства образования и науки Российской Федерации, г. Пермь.

Научный руководитель: **Шумилов Александр Владимирович**  
доцент кафедры геофизики,  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Рамазанов Айрат Шайхуллинович**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
геофизики Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Башкирский  
государственный университет» (г. Уфа)

**Потехин Денис Владимирович**  
кандидат технических наук, начальник управления  
геологического моделирования и подсчета запасов  
Филиала ООО «ЛУКОЙЛ–Инжиниринг»  
«ПермНИПИнефть» (г. Пермь)

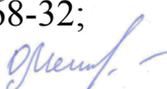
Ведущая организация: АО «НПФ «Геофизика» (г. Уфа)

Защита состоится «28» июня 2018 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.207.02 на базе ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева 15, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева 15.

Электронная версия текста диссертации доступна на сайте ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»: [www.psu.ru](http://www.psu.ru).

Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки РФ: [vak.ed.gov.ru/vak](http://vak.ed.gov.ru/vak) и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»: [www.psu.ru](http://www.psu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.  
Тел. (342) 239-62-89, факс: (342) 239-68-32; e-mail: [olgam.psu@gmail.com](mailto:olgam.psu@gmail.com)  
Ученый секретарь, к.т.н.  Мещерякова Ольга Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследований**

Контроль забойного давления является важнейшим элементом общей системы мониторинга за процессом разработки нефтяного месторождения, а промыслово-геофизические методы – одним из его инструментов. Использование в компоновке устройства для вскрытия пластов специального геофизического прибора, измеряющего забойное давление, позволяет с высокой степенью достоверности контролировать величину забойного давления на разных этапах «жизни» скважин. В настоящее время, при отсутствии геофизических приборов, забойное давление определяется расчетным путем, что зачастую сопровождается значительными ошибками. В этой связи представляется актуальным интегрированный анализ материалов геофизических измерений, направленный на разработку методов достоверного определения забойного давления при эксплуатации скважин, необорудованных глубинными приборами.

**Объектом исследования** являются добывающие скважины нефтяных месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», эксплуатирующиеся установками электроцентробежных насосов.

**Предметом исследования** является материал промыслово-геофизических исследований для мониторинга забойного давления в процессе заканчивания и эксплуатации скважин.

**Целью работы** является исследование и совершенствование методов мониторинга забойного давления в нефтедобывающих скважинах по данным промыслово-геофизических исследований.

### **Основные задачи исследований**

1. Разработка технологии вторичного вскрытия на депрессии с возможностью контроля забойного давления.
2. Использование результатов промыслово-геофизических исследований для оценки достоверности методик определения забойного давления в добывающих механизированных скважинах.
3. Разработка усовершенствованной методики определения забойного давления в добывающих скважинах, основанная на комплексном использовании материалов промыслово-геофизических исследований.

### **Научная новизна**

1. Разработана технология перфорации скважин на депрессии с использованием геофизических приборов для непрерывного мониторинга величины забойного давления и исключенным промежуточным глушением скважины до ее ввода в эксплуатацию. Преимущественной особенностью разработанной технологии является возможность ее реализации в скважинах малого диаметра и боковых стволах.

2. Интегрированный анализ материалов промыслово-геофизических исследований позволил установить разнонаправленное во времени влияние одних и тех же показателей эксплуатации скважин на величину забойного давления.

3. Впервые построены многомерные временные модели, учитывающие влияние на величину забойного давления показателей эксплуатации скважин для объектов разработки тульско-бобриковской залежи (Тл-Бб) Шершневого и турне-фаменского (Т-Фм) Маговского месторождений.

#### **Защищаемые положения**

1. Технология заканчивания скважин на депрессии и выводом на режим без промежуточного глушения с использованием геофизических приборов [1, 4–7, 9–11, 13–18].

2. Многомерные модели для определения забойного давления по геолого-геофизическим данным скважин, оборудованных геофизическими приборами [8, 12].

3. Методика оценки забойного давления в скважинах, необорудованных геофизическими приборами, с использованием многомерных статистических моделей [2, 3, 8, 12].

#### **Практическая значимость работы**

1. Предложенная технология перфорации скважины на депрессии за счет дополнительного введения в компоновку геофизических приборов и глубинного насоса позволит непрерывно контролировать величину забойного давления в ходе перфорации и сразу, без промежуточного глушения, запускать скважину в эксплуатацию. Реализация технологии возможна также в скважинах малого диаметра и боковых стволах.

2. Разработанная методика оценки забойного давления позволяет определять его в скважинах, не оборудованных глубинными измерительными системами.

#### **Апробация работы и публикации**

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 18 научных работах, в том числе в 11 статьях по перечню ВАК; патенте и одной монографии [1].

#### **Фактический материал**

Для достижения поставленной цели в работе использованы следующие материалы:

- данные о плановых и фактически достигнутых значениях показателей эксплуатации скважин, на которых реализована разработанная технология заканчивания;
- данные о более 200 совместных замерах давлений, выполненных глубинными геофизическими приборами под насосами, и основных показателей эксплуатации скважин, оборудованных этими приборами.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Текст изложен на 135 страницах машинописного текста, иллюстрирован 55 рисунками и содержит 23 таблицы. Список литературы включает 101 наименование.

Автор выражает искреннюю признательность за помощь и поддержку своему научному руководителю А. В. Шумилову, а также А. Д. Савичу, А. И. Дзюбенко и В. И. Пузикову.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и основные задачи исследования, защищаемые положения, научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** на основании данных А. И. Булатова, С. Г. Вольпина, И. Н. Гайворонского, В. С. Дубровского, А. И. Ипатова, В. И. Костицына, Н. И. Крысина, А. И. Савича и других авторов выполнен анализ эффективности применения промыслово-геофизических методов контроля показателей эксплуатации скважин. Установлено, что на этапе заканчивания скважин с реализацией щадящей технологии вторичного вскрытия пласта (перфорации на депрессии) проблема контроля забойного давления является весьма актуальной. Существующие технологии перфорации на депрессии характеризуются существенным недостатком, заключающимся в отсутствии линии связи глубинного технологического оборудования с поверхностью, что не позволяет устанавливать измерительные дистанционные приборы для оперативной оценки величины депрессии, гидродинамических параметров пласта и исключает возможность осуществления мониторинга забойного давления. Также проблемной является реализация существующих технологий в скважинах малого диаметра и боковых стволах, количество которых увеличивается с каждым годом.

Контроль величины забойного давления в процессе эксплуатации скважин является важной задачей мониторинга и управления разработкой любой нефтяной залежи. При решении этой задачи используют данные промыслово-геофизических исследований, являющихся одним из основных способов мониторинга показателей эксплуатации скважин. На нефтяных месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» с целью контроля показателей эксплуатации скважин механизированного фонда используют специальные глубинные измерительные системы, геофизические приборы типа ФОТОН-К, Геостар и др., измеряющие давление и температуру на глубине установки приборов, значения которых в дальнейшем достаточно точно пересчитываются на пластовые условия. На сегодняшний день доля оснащённости такими системами, приборами добывающих скважин в целом по предприятию не превышает 30%. В скважинах, не оборудованных приборами под насосом или блоками погружной телеметрии, определение забойного давления осуществляется путем пересчета величины непосредственно измеряемого динамического уровня. При выполнении данных расчетов используют формулы гидростатики, в которых неизвестной величиной является плотность флюида в каждом интервале, т.е. в основе расчета забойного давления лежит определение характеристик многофазного потока в стволе скважины. Данная задача является весьма актуальной для нефтедобывающей отрасли в Пермском крае, когда извлечение углеводородов осуществляется значительным количеством низкодебитных механизированных скважин, не оборудованных глубинными измерительными системами. В разное время исследованием характеристик потока многофазной жидкости в стволе скважины занимались известные российские и зарубежные ученые: В. Г. Грон., И. Т. Мищенко, А. П. Крылов, В. А. Сахаров, Р. А. Валиуллин, А. Ш. Рамазанов,

J. Orkiszewski, H. D. Beggs, J. P. Brill, A. R. Hasan, C. S. Kabir, H. Mukherjee и др. В настоящее время в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» применяется ряд методик для расчета забойного давления. Во всех этих методиках используются модели течения флюида в скважине, не учитывающие всех процессов, возникающих в стволе скважины при движении по нему многофазной жидкости. В этой связи актуальной представляется разработка принципиально другой методики, основанной на математической обработке накопленных для каждого объекта данных и создании многомерных статистических моделей.

**Во второй главе** представлен вариант усовершенствования технологии перфорации скважин на депрессии, позволяющий существенно увеличить продуктивность скважин за счет очистки прискважинной зоны пласта. При этом учтены разработки известных ученых и специалистов: И. Н. Гайворонского, В. С. Замахаева, А. А. Меркулова, Р. А. Шакирова, А. Д. Савича, А. В. Черепаникова, Charlie Cosada, Dennis Baxter, Harvey Williams и др.

Поскольку в качестве основного недостатка известной технологии является отсутствие канала связи с поверхностью, в работе предложена оригинальная схема компоновки оборудования (в том числе устьевого), позволяющего включать в нее геофизический прибор и кабель (рис. 1). Достижение проектного забойного давления с целью создания проектной депрессии, контролируемого геофизическим прибором, осуществляется с помощью глубинного насоса, который включается в компоновку оборудования для прострелочно-взрывных работ. Наличие насоса в компоновке оборудования позволяет не только оперативно управлять величиной забойного давления и депрессии на пласт при проведении перфорации, но и вводить скважину в эксплуатацию сразу после проведения перфорации без дополнительного глушения скважины. Необходимо отметить, что на конструкцию геофизического прибора и на технологию его использования получен патент [13].

Результатом реализации предложенной технологии является:

- непрерывный мониторинг и оперативное управление величинами забойного давления и депрессии на пласт;
- оперативная оценка гидродинамических параметров пласта после вскрытия;
- исключение ухудшения свойств продуктивного пласта в призабойной зоне (за счет исключения промежуточного глушения), очистка перфорационных каналов и пласта.

Предложенная технология перфорации на депрессии, сопровождаемая непрерывным промыслово-геофизическим контролем, продемонстрировала значительный положительный результат при реализации на скважинах, эксплуатирующих нефтяные месторождения ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». При этом технология одинаково успешна на месторождениях с различной геолого-физической характеристикой, расположенных на всей территории Пермского края. В целом, по данным выполненного анализа, фактические дебиты нефти после ввода скважин в эксплуатацию превышают плановые значения на 66 %. В качестве преимущественной особенности данной технологии следует отметить возможность ее реализации в скважинах малого диаметра и боковых стволах.

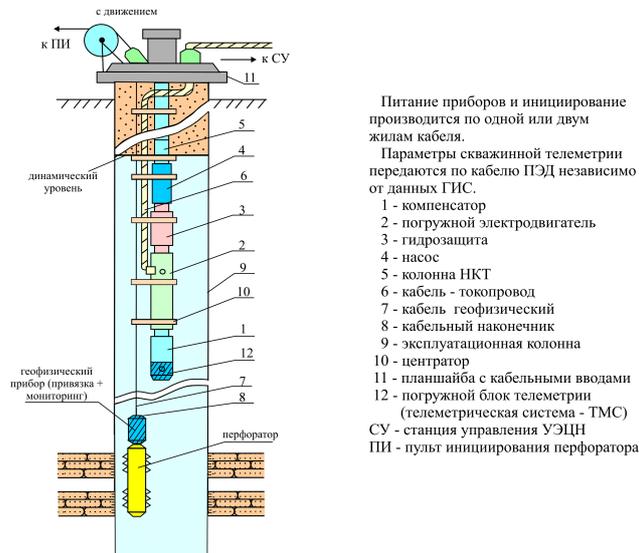


Рис. 1. Схема расположения оборудования при вторичном вскрытии пластов под установкой электроцентробежного насоса

**Третья глава** посвящена анализу применяемых в регионе способов определения забойных давлений в механизированных скважинах, оборудованных и не оборудованных глубинными геофизическими приборами.

Менее трети добывающего фонда в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» оснащены геофизическими приборами, установленными на приеме насоса. В диссертационной работе приведен подробный обзор таких геофизических приборов. Установлено, что самым распространенным является скважинный геофизический прибор ФОТОН-К (манометр-термометр-влажномер). Определение величин забойных давлений в скважинах с таким (или аналогичными) прибором осуществляется путем пересчета от измеренного давления на приеме насоса, что, как правило, не сопровождается существенными трудностями.

Забойные давления в скважинах, не оборудованных геофизическими приборами, определяют путем пересчета измеряемых устьевых параметров. Основную трудность такого подхода к определению забойного давления представляет собой необходимость вычисления характеристик многофазного потока в стволе скважины, особенно его плотности. В диссертации выполнен обзор распространенных в мировой практике методик определения характеристик многофазного потока (Poelman and Carpenter, Waxendell and Thomas, Hagedorn and Brown, Hasan and Kabir; Ansari и др.). К используемым в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» методикам определения забойного давления по данным устьевых замеров следует отнести алгоритмы, предложенные ООО «Универсал-Сервис» и Пермским национальным исследовательским политехническим университетом (ПНИПУ). Обе методики основаны на выделении в стволе скважины характерных интервалов и расчете показателей многофазного потока в этих интервалах. В работе выполнено сравнение значений забойных давлений, рассчитанных по этим методикам, с данными 235 его непосредственных измерений, выполненных с помощью геофизического прибора типа ФОТОН-К, на скважинах Шершневого и Маговского месторождения. Объект проверки для первого месторождения – терригенная тульско-бобриковская залежь со средней газонасыщенностью пластовой нефти,

для второго – карбонатная турне-фаменская залежь с высокой газонасыщенностью пластовой нефти.

При вычислении забойного давления по модели ООО «Универсал-Сервис» используются значения динамического уровня  $H_d$  (м), затрубного давления  $P_{затр}$  и плотности жидкости  $\rho_{ж}$  (кг/м<sup>3</sup>). При обосновании модели для вычисления значений забойного давления по методике ПНИПУ использованы следующие показатели: дебит жидкости  $Q_{ж}$  (м<sup>3</sup>/сутки), пластовое давление  $P_{пл}$  (МПа), глубина погружения насоса под динамический уровень  $H_{погр}$  (м),  $H_d$ ,  $P_{затр}$ .

Сравнение средних значений данных и плотностей их распределений выполнено с помощью t-критерия Стьюдента. Известно, что различие в средних значениях считается статистически значимым, если  $t_p > t_t$ . Значения  $t_t$  определяются в зависимости от количества сравниваемых данных и уровня значимости ( $\alpha = 0,05$ ). Сравнение прогнозных средних значений с фактическими средними значениями  $P_{заб}$  и плотности распределений приведены в табл. 1. Также выполнено сравнение плотностей распределений с помощью статистики Пирсона  $\chi^2$  (табл. 1).

Анализ значений критериев  $t$  и  $\chi^2$  показал, что как средние значения, так и плотности распределений фактических и расчетных (модельных) значений  $P_{заб}$  являются статистически неразличимыми.

На следующем этапе исследований выполнено сравнение фактических и рассчитанных забойных давлений с помощью построения корреляционных полей и вычисления коэффициентов корреляции  $r$  (табл. 2).

Таблица 1

## Сравнение средних значений показателей

Статистические характеристики показателей			Критерии	
Шершневское месторождение			$\frac{t}{p}$	$\frac{\chi^2}{p}$
$P_{заб}$ , МПа	$P_{заб}^{М-УС}$ , МПа	$P_{заб}^{М-ПНИПУ}$ , МПа		
9,17±3,33	8,57±3,61		$\frac{1,339164}{0,181887}$	$\frac{1,921678}{0,445391}$
9,17±3,33		8,60±3,45	$\frac{1,245433}{0,214285}$	$\frac{1,908392}{0,385124}$
Маговское месторождение				
9,69±4,15	9,23±2,98		$\frac{-0,519419}{0,603939}$	$\frac{3,394039}{0,412175}$
9,69±4,15		8,99±2,78	$\frac{1,543397}{0,124030}$	$\frac{3,376557}{0,184837}$

Корреляционная матрица  
(верхняя строка – объект разработки Тл-Бб Шершневого,  
нижняя строка – Т-фм Маговского месторождений)

	$P_{\text{заб}}, \text{МПа}$	$P_{\text{заб}}^{\text{М-УС}}, \text{МПа}$	$P_{\text{заб}}^{\text{М-ПНИПУ}}, \text{МПа}$
$P_{\text{заб}}, \text{МПа}$	<u>1,00</u> 1,00	<u>0,59*</u> 0,69*	<u>0,58*</u> 0,68*
$P_{\text{заб}}^{\text{М-УС}}, \text{МПа}$		<u>1,00</u> 1,00	<u>0,94*</u> 0,98*
$P_{\text{заб}}^{\text{М-ПНИПУ}}, \text{МПа}$			<u>1,00</u> 1,00

Примечание: \*значимые корреляционные связи

Из табл. 2 видно, что между фактическими, измеренными геофизическим прибором ФОТОН-К, и вычисленным по методикам ООО «Универсал-Сервис» и ПНИПУ забойными давлениями, наблюдаются значимые корреляционные связи.

Однако, выполненный анализ построенных полей корреляции показал, что между  $P_{\text{заб}}$  и  $P_{\text{заб}}^{\text{М-УС}}$ ,  $P_{\text{заб}}^{\text{М-ПНИПУ}}$  наблюдаются сложные соотношения в их пределах. В ряде случаев наблюдается группирование соотношений между  $P_{\text{заб}}$  и  $P_{\text{заб}}^{\text{М-УС}}$ , а также  $P_{\text{заб}}$  и  $P_{\text{заб}}^{\text{М-ПНИПУ}}$  в различных диапазонах забойных давлений. Это, вероятно, свидетельствует о то, что статистически значимые значения коэффициентов корреляции  $r$  получены в результате объединения достаточно неоднородной выборки.

По мнению автора диссертационной работы, причиной данного обстоятельства является весьма затруднительное определение плотности газожидкостной смеси в различных интервалах по стволу скважины. В этой связи представляется актуальной разработка другого метода определения забойного давления, основанного на использовании в качестве исходных данных параметров работы скважин, определение которых в любой период эксплуатации является достаточно точными.

**Четвертая глава** посвящена разработке принципиально новой методике определения забойного давления, основанной на математической обработке накопленных для каждого объекта данных промыслово-геофизических исследований и создании многомерных статистических моделей.

Основанием для решения данной задачи послужило наличие значительного количества (более 200) промыслово-геофизических исследований с параллельной регистрацией устьевых параметров в период с 2012 по 2016 годы. Дополнительно к использованным ранее показателям, к анализу были привлечены данные по дебитам нефти  $Q_n$  (т/сут), обводненности продукции  $B$  (%), погружению насоса под динамический уровень  $H_{\text{нас}}$  (м) и расстоянию до водонефтяного контакта  $H_{\text{внк}}$  (м).

На первом этапе исследований выполнен анализ изменения значений привлеченных показателей эксплуатации, в том числе и забойного давления во времени. Также оценено влияние этих показателей эксплуатации скважин на

величину  $P_{\text{заб}}$ . Оценка индивидуального влияния показателей эксплуатации скважин, приведенных выше, на забойное давление, произведена с помощью построения корреляционных полей, их анализа и вычисления коэффициентов корреляции  $r$  (табл. 3).

Анализ значений коэффициентов  $r$  и полей корреляции позволил установить в ряде случаев разнонаправленность влияния одного и того же показателя на величину  $P_{\text{заб}}$  с течением времени  $T$ . Данное явление установлено впервые, и это свидетельствует о необходимости учета временного фактора на формирование значений  $P_{\text{заб}}$  при построении многомерных математических моделей.

Таблица 3

Корреляционная матрица  
(верхняя строка – объект разработки Тл-Бб Шершневого,  
нижняя строка – Т-фм Маговского месторождений)

	$P_{\text{заб}}$	$H_{\text{д}}$	$P_{\text{загр}}$	$B$	$Q_{\text{ж}}$	$Q_{\text{н}}$	$H_{\text{внк}}$	$H_{\text{нас}}$	$H_{\text{погр}}$
$P_{\text{заб}}$	$\frac{1,00}{1,00}$	$\frac{-0,53^*}{-0,56^*}$	$\frac{0,16}{0,53^*}$	$\frac{0,34^*}{0,40^*}$	$\frac{0,51^*}{0,50^*}$	$\frac{0,34^*}{0,52^*}$	$\frac{0,41^*}{-0,43^*}$	$\frac{-0,19}{-0,32^*}$	$\frac{0,43^*}{0,39^*}$
$H_{\text{д}}$		$\frac{1,00}{1,00}$	$\frac{0,02}{-0,30^*}$	$\frac{-0,15}{-0,20}$	$\frac{-0,58^*}{0,49^*}$	$\frac{-0,48^*}{-0,50^*}$	$\frac{0,05}{0,13}$	$\frac{-0,11}{0,00}$	$\frac{-0,95^*}{-0,92^*}$
$P_{\text{загр}}$			$\frac{1,00}{1,00}$	$\frac{0,03}{0,47}$	$\frac{0,25^*}{0,64^*}$	$\frac{0,17}{0,65^*}$	$\frac{0,16}{-0,41^*}$	$\frac{-0,05}{0,00}$	$\frac{-0,04}{0,28^*}$
$B$				$\frac{1,00}{1,00}$	$\frac{0,21^*}{0,67^*}$	$\frac{-0,37^*}{0,63^*}$	$\frac{0,32^*}{-0,45^*}$	$\frac{-0,44^*}{0,39^*}$	$\frac{0,00}{0,34^*}$
$Q_{\text{ж}}$					$\frac{1,00}{1,00}$	$\frac{0,81^*}{0,99^*}$	$\frac{0,33^*}{-0,39^*}$	$\frac{0,22^*}{0,35^*}$	$\frac{0,59^*}{0,59^*}$
$Q_{\text{н}}$						$\frac{1,00}{1,00}$	$\frac{0,16}{-0,41^*}$	$\frac{0,40^*}{0,29^*}$	$\frac{0,56^*}{0,58^*}$
$H_{\text{внк}}$							$\frac{1,00}{1,00}$	$\frac{0,28^*}{0,43^*}$	$\frac{0,24}{0,05}$
$H_{\text{нас}}$								$\frac{1,00}{1,00}$	$\frac{0,41^*}{0,39^*}$
$H_{\text{погр}}$									$\frac{1,00}{1,00}$

Примечание: \*значимые корреляционные связи

В соответствии с использованным в диссертационной работе подходом, обусловленным необходимостью учета временного фактора, построено более 200 многомерных моделей. Далее характеристики построенных моделей (свободные члены и коэффициенты при показателях, значения коэффициентов множественной корреляции  $R$ ) были детально проанализированы, в результате чего выявлено их свойство группирования по значениям во времени. Наиболее рельефно это можно проследить по изменению коэффициентов  $R$  во времени в многомерных моделях для пластов Тл-Бб Шершневого и Т-Фм Маговского месторождений (рис. 2).

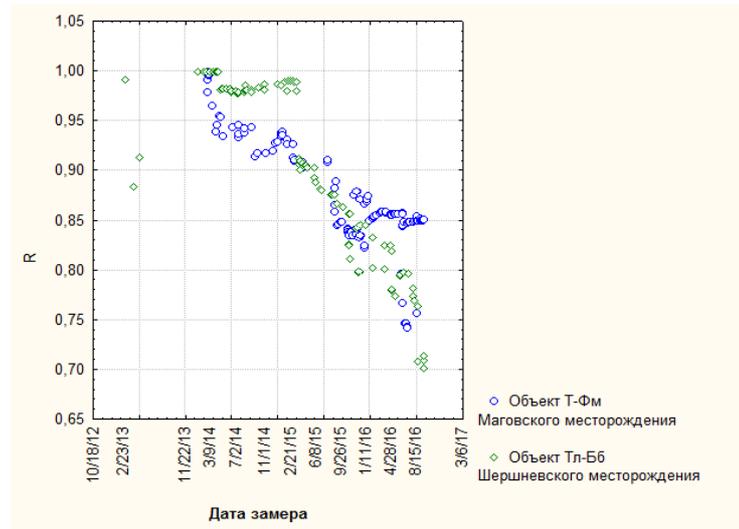


Рис. 2. Изменение значений коэффициентов множественной корреляции R

Отсюда видно, что для объекта разработки Тл-Бб Шершневого месторождения наблюдается два типа соотношений между R и T, тогда как для объекта разработки Т-Фм Маговского месторождения этих соотношений значительно больше. В диссертации также выполнен детальный анализ изменений значений свободных членов и коэффициентов при показателях в построенных временных моделях.

Для количественного разделения на наблюдаемые классы использован линейный дискриминантный анализ, который подтвердил эти классы. В дальнейшем выделенные классы были использованы при построении многомерных моделей. Механизм выделения временных классов подробно описан в диссертации.

Для объекта Тл-Бб Шершневого месторождения многомерная модель, построенная по всем данным, имеет следующий вид:

$$P_{\text{заб}}^M = -206,749 - 0,004N_d + 0,112N_{\text{внк}} - 0,005N_{\text{нас}} + 0,015Q_{\text{ж}} + 0,714P_{\text{затр}} \quad (1)$$

при  $R = 0,714$ ;  $p < 0,0000$ ; стандартная ошибка составляет 2,38 МПа.

С учетом разделения выборки на два класса построены уравнения регрессии. В первом случае уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$P_{\text{заб}}^{M1} = -302,410 - 0,004N_d + 0,163N_{\text{внк}} + 0,189V + 1,475P_{\text{затр}} - 0,011N_{\text{нас}} + 0,029Q_{\text{н}}, \quad (2)$$

при  $R = 0,907$ ;  $p < 0,0000$ ; стандартная ошибка 1,61 МПа.

Во втором случае уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$P_{\text{заб}}^{M2} = -75,837 - 0,0032N_d - 0,0065N_{\text{нас}} + 0,0306Q_{\text{ж}} + 0,0483N_{\text{внк}}, \quad (3)$$

при  $R = 0,717$ ;  $p < 0,0000$ ; стандартная ошибка 2,21 МПа.

Далее каждый из классов также разделен на два подкласса, для каждого из подклассов также получены уравнения по определению забойного давления ( $P_{\text{заб}}^{M1-1}, P_{\text{заб}}^{M1-2}, P_{\text{заб}}^{M2-1}, P_{\text{заб}}^{M2-2}$ ), которые имеют следующие виды:

$$P_{\text{заб}}^{M1-1} = -62,452 + 0,0924Q_{\text{н}} - 0,0083N_{\text{нас}} + 0,0405N_{\text{внк}}, \quad (4)$$

при  $R=0,981$ ,  $p<0,0000$ , стандартная ошибка составляет 0,59 МПа.

$$P_{\text{заб}}^{M1-2} = -311,432 + 0,177V + 0,171N_{\text{внк}} - 0,005N_d - 0,014N_{\text{нас}} +$$

$$+ 1,748P_{\text{затр}}, \quad (5)$$

при  $R=0,876$ ,  $p<0,0000$ , стандартная ошибка составляет 2,14 МПа.

$$P_{\text{заб}}^{M2-1} = -59,749 + 0,0453Q_{\text{ж}} - 0,0185H_{\text{нас}} + 0,003H_{\text{погр}} + 0,048H_{\text{внк}}, \quad (6)$$

при  $R=0,796$ ,  $p<0,0000$ , стандартная ошибка составляет 1,92 МПа.

$$P_{\text{заб}}^{M2-2} = -1364,96 - 0,02H_{\text{д}} + 0,50Q_{\text{н}} + 0,67H_{\text{внк}} - 0,24Q_{\text{ж}} + 5,35P_{\text{затр}} + 0,08B + 0,01H_{\text{нас}}, \quad (7)$$

при  $R=0,837$ ,  $p<0,00063$ , стандартная ошибка составляет 2,04 МПа.

Обобщенная модель, учитывающая построенные по временному признаку модели, имеет вид

$$P_{\text{заб}}^{MM} = 0,874 + 0,085P_{\text{заб}}^M + 0,312 (P_{\text{заб}}^{M1}, P_{\text{заб}}^{M2}) + 0,701 (P_{\text{заб}}^{M1-1}, P_{\text{заб}}^{M1-2}, P_{\text{заб}}^{M2-1}, P_{\text{заб}}^{M2-2}), \quad (8)$$

при  $R = 0,893$ ;  $p < 0,0000$ ; стандартная ошибка 1,51 МПа.

Для практической реализации по объекту Т-Фм Маговского месторождения при прогнозе значений  $P_{\text{заб}}$  первоначально построим многомерную модель по всем данным, которая имеет следующий вид:

$$P_{\text{заб}}^M = -899,426 - 0,003H_{\text{д}} + 0,451P_{\text{затр}} - 0,024H_{\text{нас}} + 0,129B + 0,410H_{\text{внк}} + 0,092Q_{\text{ж}} - 0,269Q_{\text{н}}, \quad (9)$$

при  $R=0,851$ ,  $p<0,0000$ , стандартная ошибка составляет 2,24 МПа.

Для учета изменения значений  $P_{\text{заб}}$  во времени дополнительно построены три модели, которые приведены ниже.

Первый класс:

$$P_{\text{заб}}^{M-1} = 13,81 + 0,03715Q_{\text{ж}} - 0,00461H_{\text{д}} + 0,07348B, \quad (10)$$

при  $R=0,901$ ,  $p<0,0000$ , стандартная ошибка составляет 1,88 МПа.

Второй класс:

$$P_{\text{заб}}^{M2} = -1381,77 + 0,81P_{\text{затр}} - 0,03H_{\text{нас}} + 0,14Q_{\text{ж}} + 0,62H_{\text{внк}} + 0,15B, \quad (11)$$

при  $R=0,876$ ,  $p<0,0000$ , стандартная ошибка составляет 1,93 МПа.

Третий класс

$$P_{\text{заб}}^{M3} = -793,206 - 0,037H_{\text{нас}} + 0,185B + 0,373H_{\text{внк}} - 0,259Q_{\text{ж}} - 0,969P_{\text{затр}} \quad (12)$$

при  $R=0,922$ ,  $p<0,0000$ , стандартная ошибка составляет 1,79 МПа.

Обобщенная модель, учитывающая построенные по временному принципу модели, имеет следующий вид:

$$P_{\text{заб}}^{MM} = -0,102 + 1,039 (P_{\text{заб}}^{M1}, P_{\text{заб}}^{M2}, P_{\text{заб}}^{M3}) - 0,031P_{\text{заб}}^M, \quad (13)$$

при  $R = 0,945$ ;  $p < 0,0000$ ; стандартная ошибка 1,38 МПа.

Для оценки достоверности результатов определения забойного давления по разработанным многомерным моделям, в том числе в сравнении с ранее используемыми методиками, на рис. 3 представлены корреляционные поля между фактическими (полученными с помощью геофизических приборов) и рассчитанными забойными давлениями, а также значения коэффициентов  $r$  между ними (табл. 4).

Отсюда видно, что корреляция между  $P_{\text{заб}}$  и  $P_{\text{заб}}^{MM}$  более тесная, чем между  $P_{\text{заб}}$  и  $P_{\text{заб}}^{M-УС}$ , или  $P_{\text{заб}}$  и  $P_{\text{заб}}^{M-ПНИПУ}$ . Необходимо отметить, что вид полей корреляции и значения коэффициентов  $r$  значительно отличаются. Поля корреляции свидетельствуют о значительном отклонении  $P_{\text{заб}}^{M-УС}$  и  $P_{\text{заб}}^{M-ПНИПУ}$  от фактических (измеренных геофизическим прибором) забойных давлений,

особенно при  $P_{\text{заб}} > 16$  МПа. Соотношения между  $P_{\text{заб}}$  и  $P_{\text{заб}}^{\text{ММ}}$  достаточно хорошо коррелируются на всем диапазоне значений. Сравнение средних значений забойных давлений и плотностей распределений выполнено совместно для объектов разработки Тл-Бб Шершневого и Т-Фм Маговского месторождений с помощью критериев  $t$  и  $\chi^2$  (табл. 5).

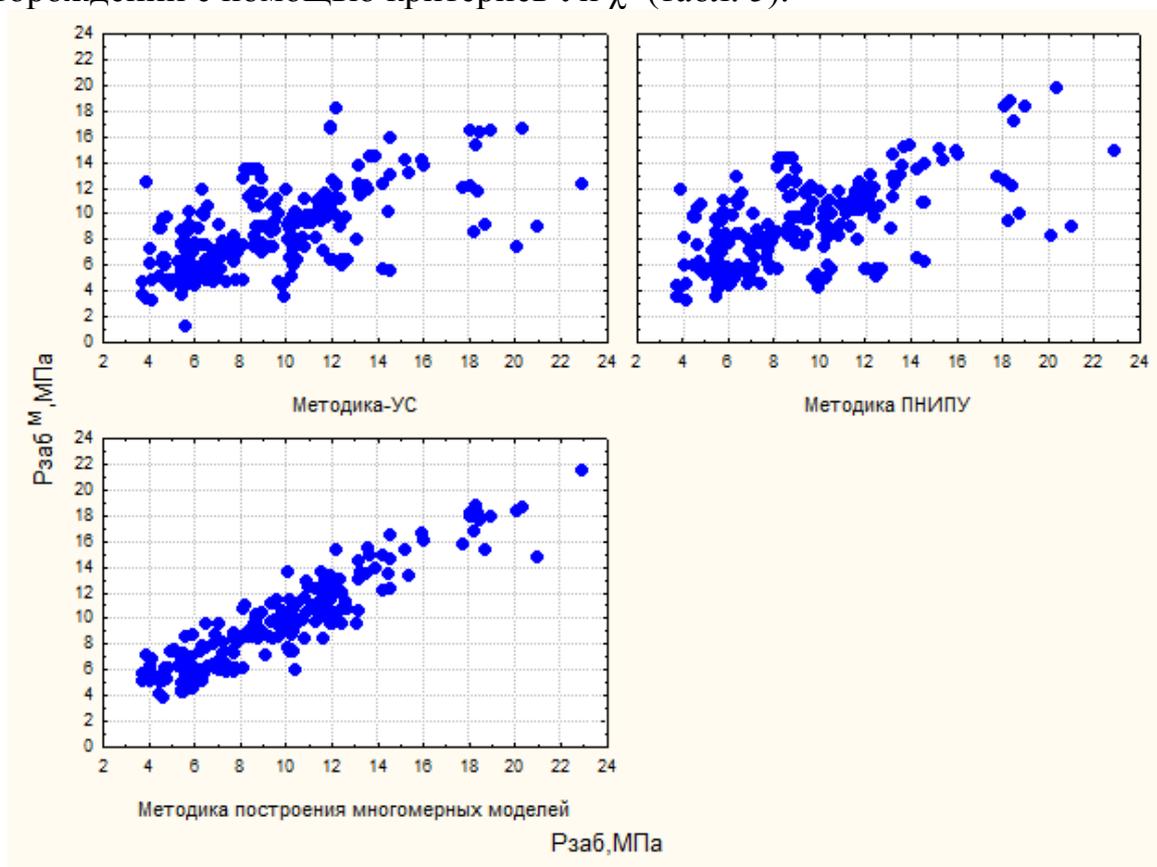


Рис. 3. Корреляционные поля между фактическими и рассчитанными (по трем методикам) забойными давлениями

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между фактическими и модельными забойными давлениями

	$P_{\text{заб}}$	$P_{\text{заб}}^{\text{М-УС}}$	$P_{\text{заб}}^{\text{М-ПНИПУ}}$	$P_{\text{заб}}^{\text{ММ}}$
$P_{\text{заб}}$	1,00	0,59*	0,60*	0,89*
$P_{\text{заб}}^{\text{М-УС}}$		1,00	0,94*	0,69*
$P_{\text{заб}}^{\text{М-ПНИПУ}}$			1,00	0,70*
$P_{\text{заб}}^{\text{ММ}}$				1,00

Примечание: \*значимые корреляционные связи

Таблица 5

Сравнение средних значений показателей и плотностей распределений

Количество измерений	$P_{\text{заб}}$ МПа	$P_{\text{заб}}^{\text{ММ}}$ , МПа	$\frac{t}{p}$	$\frac{\chi^2}{p}$
n = 235	9,44±3,78	9,46±3,54	<u>-0,010313</u> 0,991895	<u>0,471655</u> 0,989917
		$P_{\text{заб}}^{\text{М-УС}}$		
n = 235	9,44±3,78	9,28±3,23	<u>0,492681</u> 0,622469	<u>1,522208</u> 0,467156
		$P_{\text{заб}}^{\text{М-ПНИПУ}}$		
n = 235	9,44±3,78	8,81±3,12	<u>1,979295</u> 0,048368	<u>4,628244</u> 0,098857

Из табл. 5 видно, что средние значения и плотности распределений значений  $P_{\text{заб}}$  и  $P_{\text{заб}}^{\text{ММ}}$  между собой статистически не различаются. Это различие значительно статистически более сильное, чем различие  $P_{\text{заб}}$  с  $P_{\text{заб}}^{\text{М-УС}}$  и особенно с  $P_{\text{заб}}^{\text{М-ПНИПУ}}$ .

Таким образом, разработанные многомерные статистические модели позволяют прогнозировать с достаточно высокой точностью значения  $P_{\text{заб}}^{\text{ММ}}$  по комплексу обоснованных в диссертационной работе показателей в скважинах, необорудованных геофизическими приборами.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Предложена технология перфорации на депрессии, сопровождаемая непрерывным мониторингом забойного давления. При этом компоновка оборудования содержит специально разработанное техническое устройство и геофизический прибор, а также глубинный насос электроцентробежного типа. Сразу после перфорации на контролируемой прибором депрессии скважина вводится в эксплуатацию, исключая промежуточное глушение.
2. Технология успешно апробирована в разнообразных геолого-геофизических условиях, получены значительные положительные результаты. Ее преимуществом является возможность применения в скважинах малого диаметра и боковых стволах.
3. Выполненный анализ данных определения забойного давления по используемым в настоящее время методикам показал низкую степень их достоверности применительно к скважинам, в компоновке глубиннонасосного оборудования которых не используется геофизический прибор. Это свидетельствует о целесообразности разработки более совершенной методики определения забойного давления при эксплуатации скважин.
4. Разработана новая методика определения забойного давления, основанная на построении многомерных математических моделей, созданных на основе статистической обработки результатов промыслово-геофизических исследований и показателей эксплуатации скважин. Следует отметить, что определение входных параметров многомерных математических моделей на практике не сопровождается значительными трудностями.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шумилов А.В., **Черных И.А.** Проблемы организации и оснащения системы геофизического мониторинга режимов эксплуатации нефтегазовых скважин на месторождениях севера Пермского Прикамья: монография. – Пермь: Изд. Перм. гос. нац. иссл. ун-т. – 2015. – 158 с.

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

2. Мордвинов В.А., Поплыгин В.В., **Черных И.А.** Приток в скважину, находящуюся в периодическом режиме эксплуатации, при высокой газонасыщенности пластовой нефти // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 5. – С. 66-68.

3. Лекомцев А.В., Желанов Е.В., **Черных И.А.** Статистический подход к оценке забойных давлений в добывающих скважинах // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 10. – С. 98-101.

4. Гайворонский И.Н., Костицын В.И., Савич А.Д., **Черных И.А.**, Шумилов А.В. Повышение эффективности вторичного вскрытия продуктивных пластов // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 10. – С. 62-65.

5. Гайворонский И.Н., Меркулов А.А., Шумилов А.В., Савич А.Д., **Черных И.А.**, Шуров В.М. О выборе стратегии заканчивания нефтегазовых скважин // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 11. – С. 104-108.

6. Савич А.Д., Шумилов А.В., **Черных И.А.** Лагойда Д.В. Технология непосредственного замера термодинамических параметров работы скважины // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 01. – С. 72-75.

7. Гайворонский И.Н., Савич А.Д., **Черных И.А.**, Шумилов А.В. Совершенствование технологий вторичного вскрытия продуктивных пластов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, 2016, № 9. С. 42-49.

8. **Черных И.А.** Определение забойного давления с помощью многомерных статистических моделей (на примере пласта Тл-Бб Юрчукского месторождения) // Вестник ПНИПУ. Геология, нефтегазовое и горное дело. – Т. 15. – № 21. – С. 320-328.

9. Элькинд С.Я., Савич А.Д., Денисов А.М., **Черных И.А.** Технология контроля параметров флюида в скважинах, оборудованных глубинными насосами // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд. АИС. – 2007. – Вып. 155. – С. 22-37.

10. **Черных И.А.** Оценка информативности результатов механизированных скважин дистанционными приборами, спущенными под глубинный насос // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд. АИС. – 2010. – Вып. 191. – С. 67-76.

11. **Черных И.А.** Применение новых методов геофизических исследований и технологий при бурении и освоении скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» // НТВ «Каротажник». – Тверь, 2014. – Вып. 244. – С. 137-143

12. **Черных И.А.**, Галкин В.И., Пономарева И.Н. Сравнительный анализ методик определения забойного давления при эксплуатации добывающих скважин Шершневого месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – Т.328. - № 8. – С. 41 – 47.

## Патенты

13. Савич А.Д., **Черных И.А.**, Шадрунов А.А., Шумилов А.В. Способ вторичного вскрытия пластов на депрессии со спуском перфоратора под глубинный насос и устройство для его осуществления (варианты). Патент на изобретение №2571790. М., РОСПАТЕНТ, 2015.

### В других изданиях

14. Килейко Е.С., Савич А.Д., Дзюбенко А.И., **Черных И.А.** Применение программно-управляемых геофизических приборов для определения забойных давлений в эксплуатационных скважинах // Тезисы докладов научного симпозиума «Новые геофизические технологии для нефтегазовой промышленности». – Уфа. – 2002. – С. 49-51.

15. Килейко Е.С., Савич А.Д., **Черных И.А.**, Шумилов А.В. Новые технологии информационного обеспечения разработки нефтяных месторождений // Материалы Международного технологического симпозиума «Новые технологии разработки нефтегазовых месторождений»: М., РАГС при президенте РФ. – 2004. - С. 307 – 313

16. Савич А.Д., **Черных И.А.** Новые технологии в исследовании скважин при контроле за разработкой с предварительным спуском приборов под насос // Тезисы докладов научной конференции «Информационные технологии в нефтегазовом сервисе». – Уфа, 2006. – С. 73 -74.

17. Филиппева С.Г., Савич А.Д., **Черных И.А.** Информационное обеспечение разработки нефтяных месторождений // Геология и полезные ископаемые западного Урала: сборник статей по материалам региональной научно-практической конференции. – Пермь, 2006. – С. 119-120.

18. Назаров А.Ю., **Черных И.А.**, Савич А.Д., Шадрунов А.А., Шумский И.Ф. Новые решения при проведении исследований скважин в сложных условиях и вторичного вскрытия пластов на депрессии под глубинным насосом // Материалы VIII Китайско-Российского научного симпозиума «Новые техника и технологии в нефтегазовой промышленности». – Уфа: Изд-во ОАО НПФ «Геофизика». – 2014. - С. 22-31.