

На правах рукописи

ВАЛИТОВ РАМИЛЬ АМИРХАНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
БУРЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН  
СО СВЕРХДАЛЬНИМИ ОТХОДАМИ**

Специальность 25.00.15 - "Технология бурения и освоения скважин"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа -2004

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Уфимский государственный нефтяной технический университет и ОАО "НК "Роснефть"-Сахалинморнефтегаз".

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент  
**Исмаков Рустэм Адипович.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший научный сотрудник  
**Крысин Николай Иванович;**  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
**Самигуллин Валерий Хакимович.**

Ведущая организация **НПО "Роснефть-Термнефть".**

Защита состоится " \_\_\_\_ " декабря 2004 года в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 212.289.04 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " ноября 2004 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Матвеев Ю.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Важнейшей задачей нефтегазодобывающей промышленности страны на современном этапе является увеличение разведанных запасов углеводородов и ускорение разработки открытых месторождений. При этом все большее значение приобретают разведка и освоение месторождений нефти и газа на морских и океанских шельфах.

Эффективное решение этих важнейших для народного хозяйства России проблем определяется, прежде всего, качественными и экономическими показателями строительства нефтяных и газовых скважин в различных геологических, климатических и термодинамических условиях разведки и разработки месторождений. Успешность строительства скважин при этом обеспечивается высокими скоростями бурения, разработкой и реализацией мероприятий по прогнозированию и предупреждению осложнений.

Несмотря на общность основных проблем бурения на шельфе и акваториях в каждом регионе встречаются и специфические особенности. При освоении месторождений шельфа острова Сахалин применен оригинальный метод разработки пробуренными с суши наклонными скважинами с горизонтальным окончанием, что обеспечивает высокую продуктивность скважин и существенно упрощает и удешевляет их последующую эксплуатацию. Скважины отличаются сверхдальними отходами (более 4500 м) забоев от вертикали и большими зенитными углами, что обуславливает сложную конструкцию скважин, низкую механическую скорость бурения, трудность обеспечения устойчивости ствола скважины и очистки ее от шлама. Поэтому первоочередными актуальными задачами исследований являются уточнение прочностных расчетов стенок скважины на стадии проектирования, совершенствование шарошечных долот с учетом работы с компоновкой инструмента, в состав которой постоянно включен забойный отклонитель, и рецептуры бурового раствора с оптимальными реологическими и триботехническими характеристиками, обеспечивающими мини-

мальное изменение прочностных свойств горных пород, слагающих стенки скважины.

Цель работы. Улучшение технико-экономических показателей бурения скважин со сверхдальним отклонением забоев путем совершенствования шарошечных долот и рецептур буровых растворов на базе изучения условий работы инструментов, очистки скважин от шлама, прочностных свойств горных пород и их напряженного состояния.

Основные задачи исследований:

1) изучение прочностных свойств и естественного напряженного состояния горных пород разреза месторождения с учетом изменения плотности и пористости с глубиной;

2) оценка влияния степени кольматации стенок скважины на напряженное состояние слагающих их проницаемых пород, обоснование обобщенной характеристики напряженного состояния породы в стенке наклонной скважины и прочностной расчет стенок с учетом длительной прочности породы;

3) обоснование технического решения по совершенствованию вооружения шарошечных долот применительно к особенностям бурения наклонных и горизонтальных скважин;

4) обоснование состава и свойств инвертно-эмульсионного бурового раствора для бурения наклонного и горизонтального участков ствола скважины.

Методы решения поставленных задач:

При проведении исследований были использованы аналитический метод, постановка, проработка технических решений с применением математического моделирования и теоретической механики, современные методы планирования и выполнения экспериментов с оценкой ошибки измерений и достоверности конечных результатов, промысловые испытания новых технических и технологических решений и их анализ.

Научная новизна

1. Обоснована и предложена уточненная методика расчета предельных давлений в наклонной скважине: уточнен расчет геостатического давления;

введены и апробированы по экспериментальным данным обобщенные показатели напряженного состояния горной породы, представляющие собой отношение действующих максимальных касательных напряжений к предельным.

2. Установлено, что горные породы нижненутовского подгоризонта, слагающие стенки наклонного и горизонтального участков ствола скважины, находятся в напряженном состоянии, близком или превышающем предел текучести пород.

3. Обоснована и разработана новая схема размещения вооружения в венцах шарошек с попарным размещением зубков в рядах периферийных двухрядных венцов и согласованным с ними размещением подрезных зубков калибрующего ряда.

4. Обоснован и реализован метод целенаправленного изменения свойств инвертной эмульсии при переходе из объемного состояния в фильтрационную корку на основе процесса гидролитической поликонденсации алкоксипроизводных глицерина, иницируемого температурой и концентрацией дисперсной фазы эмульсии, который обеспечивает повышенную агрегативную устойчивость корки, снижает ее сопротивление сдвигу и химически связывает воду.

#### Защищаемые положения

1. Результаты определения естественных напряжений в горных породах с учетом изменения их плотности и пористости с глубиной и прочностных характеристик пород с учетом масштабного эффекта.

2. Усовершенствованная методика расчета напряженного состояния горной породы в характерных точках стенки наклонной скважины и оценки диапазона предельных давлений бурового раствора.

3. Техническое решение по размещению элементов вооружения в венцах шарошек, обеспечивающее как предупреждение рейкообразование на забое, так и улучшение калибрующей способности долота.

4. Составы инвертно-эмульсионных растворов (ИЭР), включающие разработанный реагент эмульгатор-стабилизатор (РЭС-Т), для бурения скважин с большими зенитными углами.

### Практическая ценность работы

1. Разработан и утвержден "Стандарт предприятия по методике расчета диапазона давлений бурового раствора в скважине из условия сохранения стенок в упругом состоянии", который введен в действие и используется с 01.06.2004 г. в ОАО "НК "Роснефть"-Сахалинморнефтегаз".

2. Реагент РЭС-Т в составе разработанного на его основе инвертно-эмульсионного раствора используется при бурении скважин с большими зенитными углами в ОАО "НК "Роснефть"-Сахалинморнефтегаз". Экономический эффект по семи скважинам составил более 222 млн рублей.

### Апробация работы:

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской конференции "Геология и проблемы разработки месторождений углеводородов" (Уфа, 2001); на Всероссийской научно-практической конференции "Техносферная безопасность" (Ростов-на-Дону, 2002); на международном семинаре "Новые технологии в переработке и утилизации отработанных масел и смазочных материалов" (Москва, 2003); на научно-практической конференции "Нефтепереработка и нефтехимия" (Уфа, 2003); на 7-th Annual Event "Sakhalin Oil and Gas" (London, 2003).

Публикации по теме диссертации. Основные вопросы, рассмотренные в работе, изложены в 10 печатных работах, в том числе в двух патентах РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и рекомендаций, библиографического списка и приложения.

Работа изложена на 152 страницах машинописного текста и включает 32 рис., 29 табл., библиографический список из 115 наименований, приложения на 18 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

*В первом разделе* рассмотрено современное состояние расчетов естественных напряжений и давлений в горных породах, прочностных расчетов стенок скважин из условий предупреждения осложнений, особенности технологии бурения наклонных и горизонтальных участков ствола скважины и поставлены задачи исследований.

Исследованиям вопросов профилактики и борьбы с осложнениями при проходке ствола скважины и спуске обсадных колонн посвящены работы М.Т. Алимжанова, Б.В. Байдюка, В.Ф. Буслаева, В.С. Войтенко, А.Г. Калинина, Г.В. Конесева, В.И. Крылова, Н.И. Крысина, Л.М. Левинсона, Е.Г. Леонова, Р.Р. Лукманова, А.В. Мнацаканова, Л.К. Мухина, В.Н. Полякова, А.Н. Попова, В.Х. Самигуллина, М.К. Сеид-Рза, А.П. Сельващук, Г.А. Семенычева, Л.Е. Симонянца, А.И. Спивака, Н.С. Тимофеева, Т.Г. Фараджева, М.Д. Фаталиева, З.М. Шахмаева, Л.А. Шрейнера, И.Г. Юсупова, Р.С. Яремийчука и многих других.

В выполненных исследованиях и разработанных методиках расчета не уделено достаточного внимания точности расчетов естественного напряженного состояния горных пород и в стенках наклонных скважин, согласованию выбора методов предупреждения осложнений с уровнем напряженного состояния и литологией разреза в условиях больших углов искривления и сверхдальних отходов. Особенности обеспечения эффективного разрушения забоя вооружением долот, их работы с постоянно включенным в состав компоновки инструмента отклоняющим устройством и очистки скважины от шлама также требуют дополнительного изучения.

*Второй раздел* диссертации содержит результаты изучения напряженного состояния и прочностных свойств горных пород в условиях залегания. Геологический разрез месторождения Одопту-море представлен песчано-

глинистыми горными породами верхненутовского ( $N_{2nt_2}$ ) и нижненутовского ( $N_{1nt_1}$ ) подгоризонтов, характеристика которых представлена в табл. 1.

Таблица 1

## Литологическая характеристика месторождения Одопту-море

Стратиграфическое подразделение	Интервал, м		Горная порода		
	по вертикали	по стволу	название	% в интервале	литологическое описание
$N_{2nt_2}$	14-1059	14-2230	пески	60	средне- и крупнозернистые, кварцевые, рыхлые, с редкими прослоями глин
			песчаники	20	средне- и мелкозернистые, слабо уплотненные
			глины	20	серые, песчанистые
$N_{1nt_1}$	1059-1577	2230-5300	песчаники	50	средне- и мелкозернистые, хорошо отсортированные, алевроитовые, глинистые
			алевролиты	30	серые, разномзернистые, плотные
			глины	20	слабо песчанистые, внизу плотные, аргиллитоподобные

Относительное пластовое давление в песках и песчаниках равно 1,01 и 1,03 в верхненутовском и нижненутовском подгоризонтах соответственно и не оказывает влияния на выбор конструкции скважины. Здесь и ниже все плотности и давления даются в относительных величинах по отношению к воде с плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

Конструкция скважин, применяемая на Северном куполе месторождения, включает пять колонн: направление; кондуктор для перекрытия неустойчивых гидропроводящих песков и изоляции ствола скважины от моря; первая техническая колонна для предотвращения грифонообразований при возможных водо- и нефтепроявлениях, а также решения проблемы желобообразования на участке набора зенитного угла; вторая техническая колонна, которая перекрывает нефтеносные и водоносные пласты, а также способствует снижению сил трения при последующем спуске эксплуатационной колонны (хвостовика), что позво-

ляет спускать хвостовик с вращением для улучшения его проходимости по скважине.

Технология бурения под кондуктор и первую техническую колонну достаточно полно отработаны, поэтому в диссертационной работе основное внимание уделено задачам бурения под вторую техническую и эксплуатационную колонну (хвостовик).

При решении задачи по уточнению расчета геостатического давления были проанализированы данные, опубликованные А.П. Сельващук и др., и сделана выборка данных о плотности и пористости пород по изучаемому разрезу, выполнен соответствующий анализ и получены расчетные формулы. В пределах толщины верхненутовского подгоризонта глубина  $h$  изменяется от 0 до кровли нижненутовского подгоризонта  $h_1$ . С учетом вышеизложенного относительное геостатическое давление в пределах первого интервала равно

$$p_z = 0,5(1,82 + 1,82 + 0,000216 h) = 1,82 + 0,000108 h. \quad (1)$$

В пределах толщины нижнего подгоризонта глубина  $h$  изменяется от  $h_1$  до  $h_2$  (до подошвы нижненутовского подгоризонта), а геостатическое давление обусловлено весом горных пород всего верхненутовского подгоризонта и весом горных пород в интервале  $(h - h_1)$  нижненутовского подгоризонта, т.е

$$p_z = (1,82 + 0,000108 h_1) \frac{h_1}{h} + (1,85 + 0,000131(h + h_1)) \frac{h - h_1}{h}. \quad (2)$$

Прочностные характеристики горных пород месторождения Одопту-море определены методом статического вдавливания цилиндрического штампа с плоским основанием (методом Л.А. Шрейнера по ГОСТ 12288-66). Испытания проведены на кернах мелкозернистого и среднезернистого песчаников, алевролита и аргиллита, отобранных в нижненутовском горизонте. Для оценки влияния масштабного эффекта использовались штампы диаметром от 1,5 до 10 мм. По результатам испытаний рассчитывались среднее арифметическое значение предела текучести ( $p_0$ ) и его среднее квадратическое отклонение ( $s_p$ ).

Оценка буримости показала, что твердость горных пород не превышает четвертую категорию, но имеются включения пятой категории.

Поскольку влияние масштабного эффекта было существенным, то предел текучести горных пород был приведен к стандартному для испытаний на одноосное сжатие диаметру 42 мм:

алевролиты	$p_{042} = 92$ МПа	$s_p = 4,79$ МПа
аргиллиты	$p_{042} = 125$ МПа	$s_p = 9,25$ МПа
песчаники мелкозернистые	$p_{042} = 80$ МПа	$s_p = 2,31$ МПа
песчаники среднезернистые	$p_{042} = 46$ МПа	$s_p = 1,57$ МПа.

Полученные прочностные статистические характеристики горных пород подготовлены к использованию для расчета их паспортов прочности в соответствии с теорией прочности Мора-Кулона.

**В третьем разделе** диссертации разработано методическое обеспечение прочностных расчетов стенок наклонной скважины и выполнена оценка напряженного состояния слагающих их горных пород с точки зрения прогнозирования и предупреждения осложнений. Напряженное состояние регулируется изменением давления бурового раствора, а поэтому все расчеты выполнены относительно предельных давлений в скважине с заданной вероятностью. В бурении односторонний уровень значимости  $q$  принимается равным 0,025. В случае сочетания  $k$  независимых характеристик горной породы их общий уровень значимости также принимаем равным 0,025. Тогда уровень значимости двух независимых характеристик  $q_2$  составит около 0,158, которому соответствует параметр нормального распределения  $t \approx 1,0$ .

При бурении вертикальных и наклонных скважин для предупреждения осложнений все шире применяется искусственная кольматация стенок. Вопрос о механизме ее влияния на развитие осложнений изучен недостаточно.

Известно, что в общем виде формула для расчета давления гидроразрыва  $p_{gp}$  имеет вид

$$p_{gp} = Ap_z + Bp_n, \quad (3)$$

где  $p_z$  и  $p_n$  - геостатическое и пластовое давления соответственно;  $A$  и  $B$  - параметры уравнения, которые могут быть получены по промысловым данным или аналитически.

Горную породу охарактеризуем коэффициентом полной пористости  $m$ , равным сумме коэффициентов открытой  $m_o$  и закрытой пористости  $m_z$  параметром  $c$ , равным доле скелета на ожидаемой поверхности разрушения,

$$c = \exp(-19,1m^2), \quad (4)$$

и компонентами естественных напряжений в скелете:

$$\sigma_3 = p_n + \frac{P_z - P_n}{c}; \quad (5)$$

$$\sigma_1 = \lambda p_z + p_n(1 - \lambda)(1 - c), \quad (6)$$

где  $\sigma_3$  и  $\sigma_1$  - вертикальная и горизонтальная компоненты напряжений в скелете горной породы соответственно;  $\lambda$  - коэффициент бокового распора. Кроме того, введем коэффициент открытой пористости  $k_o$ :

$$k_o = \left( \frac{m_o}{m} \right)^{2/3},$$

который изменяется от 0 до 1. Если  $k_o = 0$ , то все поры закрыты (стенка скважины полностью закольматирована). При  $k_o = 1$  все поры открыты и сообщаются со скважиной. С учетом названных характеристик аналитически получены следующие формулы для расчета параметров уравнения (3):

$$A = \frac{2c\lambda}{1 + k_o(1 - c)}; \quad (7)$$

$$B = \frac{(1 - c)[2c(1 - \lambda) + k_o + 1]}{1 + k_o(1 - c)}. \quad (8)$$

А.П. Сельващук и др. опубликованы результаты промысловых измерений давления открытия поглощения (гидроразрыва). Результаты анализа этих данных позволили составить систему уравнений (7) и (8), найти входящие в них расчетные значения  $c_p$  и  $\lambda_p$  и провести оценку величин параметра распределения  $t$  и  $k_o$ . Принимаем, что расчетные значения этих параметров соответствуют уровню значимости  $q_2$ . Из уравнения

$$\lambda_p = \bar{\lambda} - s_\lambda t, \quad (9)$$

где  $\bar{\lambda}$  и  $s_{\lambda}$  - среднее арифметическое значение и среднее квадратическое отклонение величины  $\lambda$ , находим значения параметра  $t$ . Результаты расчетов приведены в табл. 2. Из табл. 2 видно, что расчетная величина параметра  $t$  не противоречит допущению и его следует определять по уровню значимости  $q_2$ . Все расчетные величины  $k_o$  принимают значения либо близкие к нулю, либо близкие к единице. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в песчано-глинистых горных породах только полная кольматация влияет на напряженное состояние горной породы стенки скважины. При частичной кольматации гидравлическая связь с порами пород стенки скважины достаточна, чтобы полностью нейтрализовать влияние кольматации. Достаточная непроницаемость стенки достигается только искусственной кольматацией. При этом имеет место значительное гидромеханическое и вибрационное воздействие, поэтому необходимо, чтобы горные породы в стенке имели некоторый запас прочности.

Таблица 2

Результаты расчета величин  $t$  и  $k_o$ 

Месторождение	$t$	Исходные данные для расчета $k_o$						$k_o$
		$A$	$B$	$p_{ep}$	$p_n$	$c_p$	$\lambda_p$	
Шебелинское	0,927	0,403	0,804	-	-	-	0,41	-0,004
Шебелинское	-	-	-	1,437	0,928	0,492	0,41	1,068
Ефремовское	0,780	0,500	0,678	-	-	-	0,41	-0,040
Опошнянское	1,179	0,481	0,518	-	-	-	0,37	1,075

Предел текучести  $\tau_s$  в соответствии с теорией прочности Мора-Кулона по данным стандартных испытаний рассчитывается по известной формуле. Нетрудно показать, что для скелета породы эта формула примет вид

$$\tau_{sc} = \tau_{0c} + A\sigma_{cp}, \quad (10)$$

где  $A$  - угловой коэффициент;  $\tau_{0c} = \tau_0/c$  - сопротивление сдвигу скелета при  $\sigma_{cp} = 0$ .

Величины действующих в стенке максимальных касательных  $\tau_{\max}$  и нормальных  $\sigma_{\text{ср}}$  напряжений зависят от значительного числа факторов, а поэтому для удобства принятия решения предлагается рассчитывать запас прочности  $n$  в рассматриваемой точке стенки скважины по формуле

$$n = \tau_{\text{ср}} / \tau_{\max}. \quad (11)$$

Упругому состоянию горной породы в стенке скважины с учетом длительной прочности пород (учитывается коэффициентом  $k_{\text{дл}}$ ) соответствует условие

$$k_{\text{дл}} n \geq 1. \quad (12)$$

Скважина рассматривается в цилиндрической системе координат, в которой компонента напряжений вдоль оси скважины обозначена  $\sigma_z$ , в радиальном направлении  $\sigma_R$  и в тангенциальном направлении  $\sigma_t$ . Поскольку соотношение компонент напряжений до расчета неизвестно, то расчеты выполняются для трех возможных случая напряженного состояния:

- 1) если  $|\sigma_z| > |\sigma_t| > |\sigma_R|$ , то  $\tau_{\max} = (\sigma_z - \sigma_R)/2$ ;  $\sigma_{\text{ср}} = (\sigma_z + \sigma_R)/2$ ;
- 2) если  $|\sigma_t| > |\sigma_z| > |\sigma_R|$ , то  $\tau_{\max} = (\sigma_t - \sigma_R)/2$ ;  $\sigma_{\text{ср}} = (\sigma_t + \sigma_R)/2$ ;
- 3) если  $|\sigma_z| > |\sigma_R| > |\sigma_t|$ , то  $\tau_{\max} = (\sigma_z - \sigma_t)/2$ ;  $\sigma_{\text{ср}} = (\sigma_z + \sigma_t)/2$ .

Проверка возможности использовать величину запаса прочности в качестве обобщенной характеристики напряженного состояния породы, слагающей стенку скважины, проведена по экспериментальным данным, опубликованным Н.С. Тимофеевым и др. Полые образцы горной породы, моделирующие вертикальную скважину в условиях всестороннего сжатия, нагружались давлением по оси  $z$ , моделирующим геостатическое давление, и фиксировался предел текучести породы стенки скважины. В названной работе для испытываемых горных пород приведены данные об их пористости, пределе текучести по штампу и прочности на одноосное сжатие, что позволило определить зависимости (10) с учетом масштабного эффекта. Поскольку напряжения в горной породе и давления рассчитываются в безразмерном виде, а прочностные характеристики породы размерные, то соответственно была преобразована формула (11):

$$n = \frac{k_{\text{дл}} (A\sigma_{\text{ср}} p_{\text{в}} + \tau_{0\text{с}})}{p_{\text{в}} \tau_{\text{max}}}, \quad (13)$$

где  $k_{\text{дл}}$  - коэффициент длительной прочности (в экспериментах  $k_{\text{дл}} = 1$ );  $p_{\text{в}}$  - давление столба воды на моделируемой глубине.

Расчеты показали, что минимальные значения запаса прочности стенки скважины группируются около единицы: среднее арифметическое значение по всем опытам составило 1,004, а стандартная ошибка - менее 2 %.

Наклонная скважина рассматривается в цилиндрической системе координат и характеризуется дополнительным параметром - углом искривления  $\alpha$ . Особенностями расчета  $\tau_{\text{max}}$  и  $\sigma_{\text{ср}}$  является то, что эти напряжения в стенке наклонной скважины принимают экстремальные значения на боковой стенке в т. *A* и на верхней стенке в т. *B*. Аналитически показано, что в т. *A*

$$\sigma_z = \sigma_3 \cos^2 \alpha + (\sigma_1 + 2\mu(\sigma_3 - \sigma_1)) \sin^2 \alpha; \quad (14)$$

$$\sigma_t = (3\sigma_3 - \sigma_1) \sin^2 \alpha + 2\sigma_1 \cos^2 \alpha - \sigma_R, \quad (15)$$

и в т. *B*:

$$\sigma_z = \sigma_3 (\cos^2 \alpha - 2\mu \sin^2 \alpha) + \sigma_1 (1 + 2\mu) \sin^2 \alpha; \quad (16)$$

$$\sigma_t = (3\sigma_1 - \sigma_3) \sin^2 \alpha + 2\sigma_1 \cos^2 \alpha - \sigma_R, \quad (17)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  - компоненты естественных напряжений в скелете горной породы.

Радиальные напряжения не зависят от угла  $\alpha$  и определяются по формуле

$$\sigma_R = p_n + \frac{1}{c} (p_c - p_n) \quad (18)$$

в случае непроницаемой стенки скважины, а в случае проницаемой  $\sigma_R = p_c$ .

С использованием программы Microsoft Excel автором совместно с Р.А. Исмаковым и А.Н. Поповым разработан "Стандарт предприятия по методике расчета диапазона давления бурового раствора в скважине из условия сохранения стенок в упругом состоянии", введенный в действие с 01.06.2004 г. в ОАО "НК "Роснефть"-Сахалинморнефтегаз", в который вошли рассмотренные выше методические разработки.

В расчетах в качестве аргумента принято относительное давление бурового раствора в скважине  $p_c$ . Пересечение зависимости  $n$  от  $p_c$  с ординатой  $n = 1$

соответствует критическому давлению в скважине. На рис. 1 приведен пример результатов расчета. При  $p_c < p_{сн}$  запасы прочности меньше единицы и стенка вертикальной скважины не может находиться в упругом состоянии. В диапазоне  $p_{сн} < p_c < p_{св}$  все зависимости  $n$  от  $p_c$  расположены выше ординаты  $n = 1$  ( $p_{сн}$  и  $p_{св}$  - нижнее и верхнее предельные давления в скважине). Следовательно, этот диапазон давлений в скважине обеспечивает упругое состояние ее стенок.

Расчеты показали, что при бурении в песчаниках с углом искривления более  $80^\circ$  обеспечение упругого состояния стенок скважины маловероятно. Песчаники в стенке находятся в напряженном состоянии, близком или превышающем предел текучести, что резко ускоряет усталостные процессы и повышает опасность их разрушения, а также не обеспечивает запас прочности на проведение искусственной кольтматации.

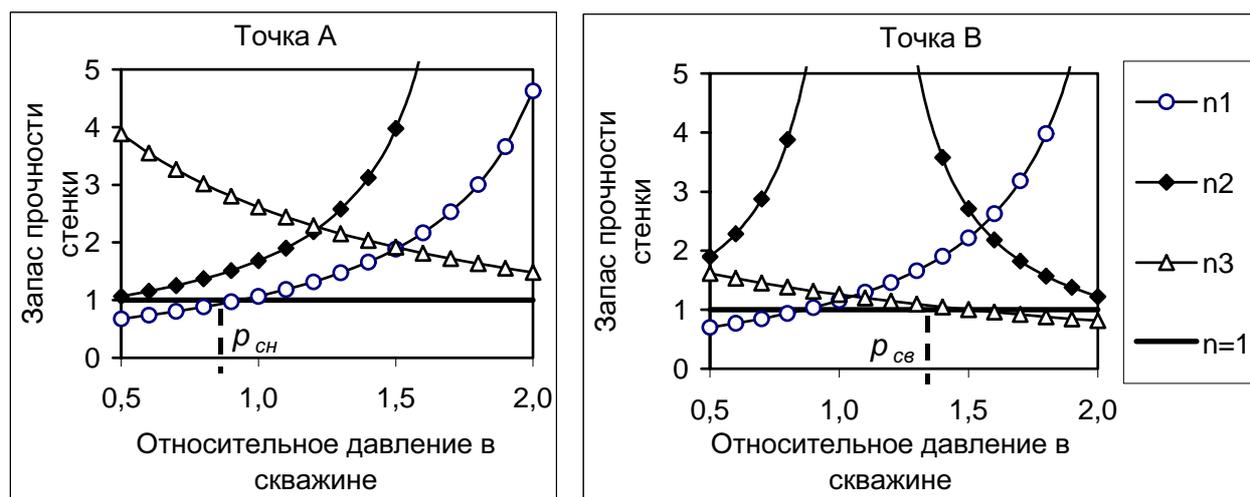


Рис. 1. Зависимости  $n$  от  $p_c$  для песчаника:  
цифры при  $n$  соответствуют случаям напряженного состояния

Расчеты, выполненные для аргиллитов, показали, что их начальная прочность обеспечивает упругое состояние стенок. По мере увеличения глубины бурения и уменьшения коэффициента длительной прочности диапазон допустимого давления в скважине быстро сужается, и на максимальной глубине бурения ( $h = 1577$  м,  $\alpha = 90^\circ$ ) область допустимого давления в скважине становится незначительной (от 1,33 до 1,40). При снижении  $k_{дл}$  до 0,5 только в кров-

ле нижненутовского подгоризонта обеспечивается упругое состояние аргиллитов.

*В четвертом разделе* диссертации представлены результаты исследований, направленных на повышение механической скорости бурения и снижение радиальных нагрузок на стенку скважины со стороны инструмента.

Бурение скважин на месторождении Одопту-море осуществляется в основном долотами фирмы Security DBS. В частности, бурение под эксплуатационную колонну (хвостовик) осуществлялось шарошечными долотами S80F (417), S82FL (437) и S83FL (447), предназначенными для мягких абразивных пород. В скобках дан код IADC. Основные сведения о работе этих долот приведены в табл. 3.

Таблица 3

Режим и показатели работы долот в интервале 4005...5589 м по стволу

Долото	Режим работы			Показатели работы		
	Нагрузка, кН	Частота вращения, об/мин	Промывка, л/с	Проходка на долото, м	Механическая скорость, м/ч	Проходка за 1 оборот, мм
S80F	50-100	85	30	60	1,02	0,20
S82FL	50-120	110	20-30	175	3,62	0,55
S83FL	120-140	110	20	155	3,86	0,58

Из табл. 3 видно, что механические скорости проходки весьма низкие. Эти интервалы в вертикальных скважинах проходятся шарошечными долотами с механической скоростью 20...50 м/ч. Основными причинами таких низких скоростей являются: во-первых, низкие осевые нагрузки на долото; во-вторых, рейкообразование на забое и зависание долот на выступах рейки. Низкие нагрузки на долото применялись из-за высокого сопротивления вращению бурильного инструмента в наклонной скважине, которое обусловлено трением о стенки скважины за счет веса лежащего на стенке инструмента и за счет усилия распора отклоняющей компоновки в скважине. Для управления кривизной используется забойный отклонитель на базе винтового двигателя, постоянно включенный в компоновку, а это значит, что бурильный инструмент и долото нагружены дополнительной радиальной силой, прижимающей их к стенке

скважины (силой распора). Задача по снижению момента сопротивления вращению инструментов должна решаться комплексно: необходимо обеспечить высокие смазывающую способность бурового раствора и эффективность работы периферийного вооружения долот.

Низкая интенсивность разрушения горной породы создает благоприятные условия для рейкообразования на забое. Такие режимы разрушения требуют уменьшенного шага поражения забоя, что достигается групповым координированным размещением зубков в венцах. Для уменьшения требуемой радиальной силы, создаваемой отклонителем, необходимо повысить эффективность работы периферийного вооружения шарошек как при разрушении забоя, так и при фрезеровании стенки скважины. При проверке гипотезы о рейкообразовании на забое была проанализирована работа вооружения серийных долот МЗ-ГВ, МЗ-ГВ-2 и МЗ-R-04 с использованием программы, разработанной в УГНТУ, которая позволяет имитировать бурение и воспроизвести на экране дисплея движение венцов шарошек с заданными геометрическими и кинематическими параметрами и формирование ими профиля забоя. Проверка показала, что периферийные и предпериферийные венцы шарошек формируют устойчивые рейки, вершины выступов которых разрушаются раздавливанием телом шарошки. Это приводит как к зависанию долота, так и к значительному износу тела шарошек.

Для предупреждения рейкообразования на забое предложено на одной шарошке часть зубков внутреннего ряда двухрядного венца разместить попарно в свету зубков внешнего ряда, а на другой шарошке часть зубков внешнего ряда разместить попарно в свету зубков внутреннего ряда. Для улучшения калибрующей способности долота и разрушения рейки непосредственно у стенки скважины и спиральных выступов на стенке на периферии этих шарошек установлены подрезные зубки. На первой шарошке такие зубки установлены слева от зубков внешнего ряда в свету зубков внешнего и внутреннего рядов и в свету парных зубков внутреннего ряда, а на второй шарошке - в свету зубков внутреннего и внешнего рядов то справа, то слева от зубков внешнего ряда. Однорядный периферийный венец третьей шарошки оставлен без изменений.

Описанное техническое решение получено и запатентовано в соавторстве с Р.А. Исмаковым, Ю.Г. Матвеевым, А.Н. Поповым и А.В. Торгашовым. Предлагаемое выполнение вооружения трехшарошечных долот позволит решить задачу как предупреждения рейкообразования на забое периферийным вооружением шарошек и повышения эффективности разрушения горных пород, так и улучшения калибрующей способности долота.

**В пятом разделе** обоснованы свойства инвертно-эмульсионного раствора (ИЭР) для бурения скважин со сверхдальними отходами и способы их реализации, разработана конкретная рецептура раствора, отвечающая условиям бурения скважин на шельфе Северного Сахалина, и приведены результаты его опытно-промышленной апробации.

При бурении буровой раствор находится в двух состояниях: одно – нормальное в объеме скважины и второе – измененное в составе фильтрационной корки на стенке скважины, в которой существенно уменьшается доля дисперсионной среды и увеличивается доля дисперсной фазы (водосодержание). Изменение свойств ИЭР при переходе его из объема в корку до сих пор не рассматривалось. Это обусловлено изначально низкой фильтруемостью и высокой естественной смазочной способностью традиционных составов ИЭР. Однако при высоком водосодержании эмульсии в корке по указанным показателям она может уступать современным буровым растворам на водной основе. Применительно к бурению скважин со сверхдальними отходами высокое качество ИЭР может быть обеспечено при:

1) максимальном предельном водосодержании  $B_{пред}$ , соответствующем такой концентрации дисперсной фазы ИЭР, при которой его термостойкость  $T_{пред}$  равна максимальной температуре в скважине;

2) минимальном предельном напряжении сдвига (ПНС) в области высоких водосодержаний ИЭР для обеспечения низкого коэффициента трения между колонной и коркой;

3) максимальных эффективной вязкости  $\eta_{эф}$ , показателе несущей способ-

ности  $n = \frac{\tau_0}{\eta_{пл}}$  и коэффициенте температурного разжижения  $k_p$  для обеспечения выноса шлама, предотвращения образования сальников и наработки в раствор коллоидной твердой фазой.

В соответствии с этими требованиями нами разработан эмульгатор-стабилизатор ИЭР РЭС-Т, действие которого основано на реализации в ИЭР управляемого процесса гидролитической поликонденсации, в котором участвуют алкоксипроизводные глицерина и дисперсная фаза эмульсии (вода). Протекание конечной стадии данного процесса корке обеспечивает последней низкое сопротивление сдвига. В то же время, поликонденсация продуктов гидролиза алкоксипроизводных глицерина в объеме ИЭР нежелательна, так как в результате снижается несущая способность раствора. Поэтому для управления поликонденсационной стадией процесса используется неионогенный эмульгатор, формирующий на межфазной поверхности эмульсии защитную оболочку, препятствующую поликонденсации продуктов гидролиза. Защитный слой эмульгатора разрушается только при повышении водосодержания и температуры ИЭР в корке, инициируя процесс поликонденсации, что обеспечивает необходимое изменение свойств раствора при переходе из объема в корку.

Свойства ИЭР на основе разработанного реагента РЭС-Т в сравнении с ИЭР на основе базовых реагентов эмульгатора-стабилизатора С-1 и эмульгатора Нефтенол-НЗ приведены в табл.4.

Таблица 4

Показатели свойств ИЭР при разных температурах

Реагент	$T, ^\circ\text{C}$	$\eta_{эф(3)},$ мПа·с	$k_p$	$n = \frac{\tau_0}{\eta_{пл}},$ $\text{с}^{-1}$	$P\Phi,$ $\text{см}^3/30 \text{ мин (АНИ)}$	$T_{пред}, ^\circ\text{C}$
РЭС-Т	30	938	1,37	1279	3,5	175
	90	1288		2674		
С-1	30	386	0,57	557	13,0	160
	90	221		863		
Нефтенол-НЗ	30	70	0,50	131	12	70
	90	35		150		

Из табл.4 следует, что разработанный реагент в сравнении с С-1 и Нефтеолом-НЗ позволяет повысить термостойкость, несущую способность, коэффициент температурного разжижения ИЭР, а также уменьшить его показатель фильтрации  $ПФ$ . Ввиду явно недостаточных стабилизирующих свойств Нефтеола-НЗ в последующих опытах использовалась композиция Нефтеола-НЗ с реагентом комплексного действия СМАД-1М (ТУ2458-001-50780546-01) в соотношении соответственно 1:3, которая обладает более высокими технологическими свойствами.

Влияние РЭС-Т и базовых реагентов на свойства корки ИЭР показано на рис.2.

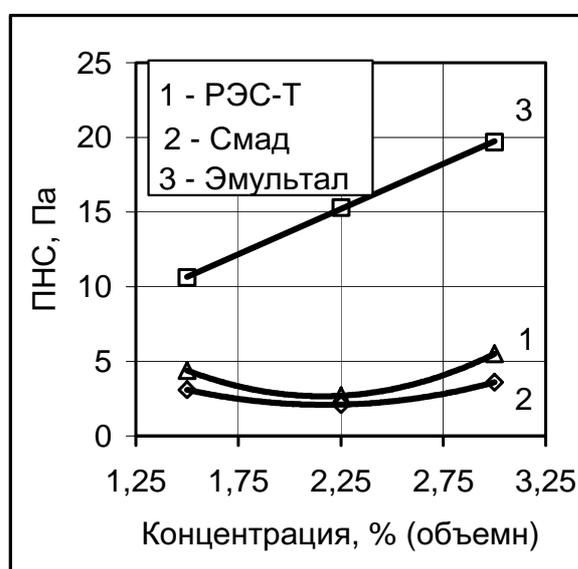


Рис. 2. Влияние концентрации реагентов в ИЭР на ПНС при водосодержании 80% и температуре 70°C

Из рис.2 видно, что применение реагентов РЭС-Т и композиции Нефтеола-НЗ и СМАД-1М (на рис. 2 обозначен "Смад") позволяеткратно снизить ПНС корки ИЭР в сравнении с применением Эмультала. Низкое предельное напряжение сдвига корки ИЭР обеспечивается при сохранении ее агрегативной устойчивости.

Таким образом, разработанный реагент соответствует требованиям как к объемным свойствам

ИЭР, так и к свойствам его корки, что позволило рекомендовать РЭС-Т для получения ИЭР, применяемого при бурении скважин со сверхдальними отходами. На состав и способ получения РЭС-Т нами в соавторстве с А.Я. Соловьевым, В.А. Благовещенским, В.А. Докичевым и др. получен патент на изобретение.

Для опытно-промышленных испытаний нами предложена рецептура ИЭР на основе дизельного топлива и водного раствора хлористого кальция в объемном соотношении 1:1, концентрация РЭС-Т в котором, согласно рис.2, была выбра-

на равной 2,25 %. После эмульгирования воды ИЭР был утяжелен баритом до плотности 1,17 г/см<sup>3</sup>. Результаты исследований несущей способности и липкости фильтрационной корки этого ИЭР и базового раствора БИЭР даны на рис.3. Рецептура БИЭР: нефть охинская – 14,9%, дизельное топливо 24,3%, водный раствор хлористого кальция ( $\rho=1,2\text{г/см}^3$ ) – 36,7%, СМАД-1М – 3%, Эмультал – 1,9%, известь – 0,9%, органоглина VG-Plus – 0,9%, барит – 17,4%. Из рис.3 следует, что предложенный раствор имеет существенные преимущества перед базовым. Применение разработанного ИЭР на скважинах месторождения Одопту-море сахалинского шельфа позволило уменьшить крутящий момент на бурильной колонне в сравнении с БИЭР в среднем на 8%, а также обеспечить спуск в скважину второй технической колонны без вращения.

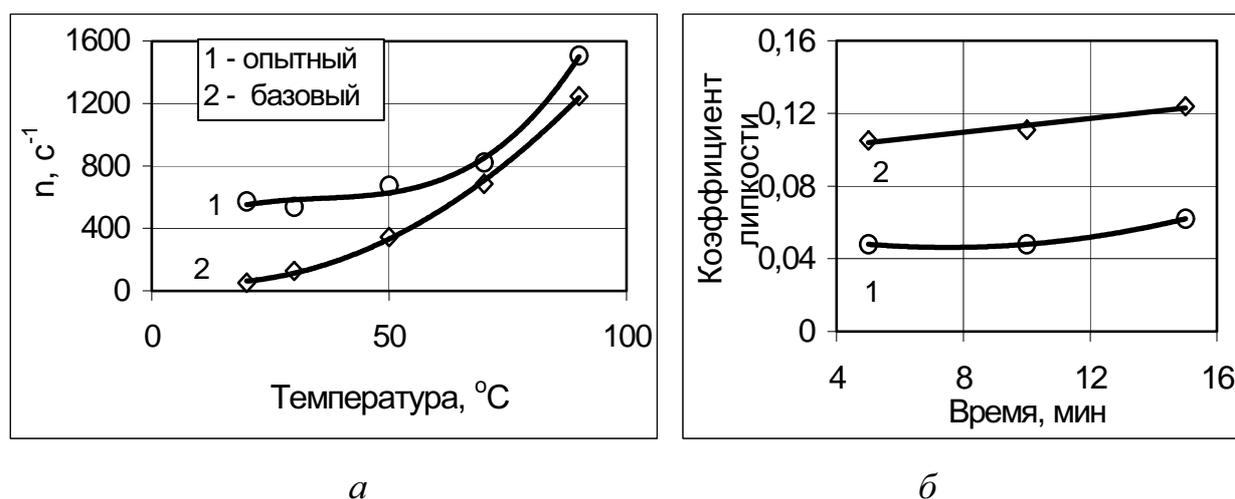


Рис. 3. Зависимости несущей способности  $n$  от температуры ИЭР (а) и липкости его корки от времени (б)

В результате применения разработанного ИЭР стоимость метра проходки снизилась на 11,3%. В целом, при бурении семи скважин со сверхдальними отходами от вертикали с промывкой разработанным ИЭР получен экономический эффект более 222 млн рублей.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Разрез месторождения Одопту-море сложен песчано-глинистыми породами второй и третьей категорий твердости. Песчаные породы имеют значительные проницаемость и глинистость, которые при взаимодействии с буровыми растворами обуславливают быстрое снижение прочности пород во времени. С увеличением глубины залегания имеет место уплотнение не только глинистых, но и песчаных пород. С учетом соответствующего изменения плотности пород предложены формулы для уточненного расчета геостатического давления.

2. С учетом масштабного эффекта определены прочностные характеристики горных пород. С использованием опубликованных данных проверено влияние степени кольматации на сопротивление стенок скважины гидроразрыву и установлено, что только полная кольматация стенок оказывает существенное влияние на сопротивление разрушению.

3. Разработана методика прочностного расчета стенок наклонной скважины, утвержденная как стандарт предприятия, и выполнены расчеты, которые показали, что горные породы разреза, вскрытые скважиной с углом искривления более  $50^\circ$ , находятся в напряженном состоянии, близком к пределу текучести или превышающем его. Отсутствие необходимого запаса прочности не гарантирует успех искусственной кольматации стенок скважины.

4. При разбуривании мягких пластичных и пластично-хрупких горных пород шарошечными долотами имеют место благоприятные условия для образования забойной рейки и зависания на ней долота, а также образование спиральных выступов на стенках, затрудняющих управление кривизной скважины. Обосновано и разработано на уровне изобретения шарошечное долото с групповым координированным размещением элементов вооружения в венцах и с новым принципом размещения дополнительных калибрующих стенок скважины зубков, обеспечивающее не только повышение эффективности разрушения забоя, но и эффективности фрезерования стенок скважины при управлении кривизной.

5. Предложен принцип адаптации свойств инвертно-эмульсионного раствора (ИЭР) при переходе его из объемного состояния в фильтрационную корку за счет реализации процесса гидролитической поликонденсации алкоксипроизводных глицерина, инициируемого температурой и концентрацией дисперсной фазы раствора.

6. Получен на уровне изобретения и испытан эмульгатор-стабилизатор ИЭР (реагент РЭС-Т), обеспечивающий высокие агрегативную устойчивость раствора и фильтрационной корки и ее антифрикционные свойства, а также химически связывающий свободную воду в корке.

7. Разработана рецептура ИЭР на основе дизельного топлива и водного раствора хлористого кальция, стабилизированного 2,25 % РЭС-Т и утяжеленного баритом. Опытные-промышленные испытания предложенного ИЭР при бурении девяти скважин со сверхдальними отходами показали, что предложенный раствор обеспечивает качественную очистку ствола скважины от шлама, долговременную устойчивость ее стенок и снижает сопротивление движению колонн в скважине.

8. При бурении семи скважин на месторождении Одопту-море получен экономический эффект свыше 222 млн руб.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Валитов Р.А., Исмаков Р.А. Безопасность бурения горизонтальных скважин при разработке шельфовых месторождений углеводородов // Геология и проблемы разработки месторождений углеводородов. - Уфа: УГНТУ, 2001. - С. 42-43.
2. Исмаков Р.А., Валитов Р.А., Хрусталева Д.Н. Аварийность при разработке месторождений углеводородов и пути ее снижения // Техносферная безопасность: Материалы 7-й Всерос. науч.-практ. конф.. - Ростов-на Дону, 2002.
3. Исмаков Р.А., Попов А.Н., Валитов Р.А. Обоснование прочностных расчетов стенок наклонной скважины // Нефтегазовое дело.- Уфа: УГНТУ, 2003.- № 1.- С.105-109.
4. Исмаков Р.А., Валитов Р.А. Вторичное применение смазочных материалов в бурении скважин // Новые технологии в переработке и утилизации отработанных масел и смазочных материалов: Сб. тез. докл. - М.: - 2003.- №11.- С. 121.

5. Разработка термоустойчивых стабилизаторов инвертных эмульсий для бурения и капитального ремонта скважин /Ф.А. Янгиров, Г.В. Конесев, А.Я. Соловьев, Р.А. Валитов и др.// Нефтепереработка и нефтехимия-2003: Материалы науч.-практ. конф.- Уфа, 2003.
6. Разработка реагентов для стабилизации гидрофобных промывочных растворов в буровой технологии /Н.Н. Истомин, Ю.П. Ферлюдин, В.И. Машков, Р.А. Валитов и др.//Нефтепереработка и нефтехимия.- Уфа, 2003.- № 10.
7. Разработка радиального уплотнения опор шарошечных долот для повышенных частот вращения /Р.А. Исмаков, Ю.Г. Матвеев, А.И. Могучев, Р.А. Валитов// Известия вузов. Нефть и газ.- 2003.- № 5.- С. 108-110.
8. Пат. № 2215111 РФ. Буровое трехшарошечное долото /Р.А.Исмаков, А.Н. Попов, Ю.Г. Матвеев, Р.А. Валитов, А.В. Торгашев; Оpubл. 27.10.03 //Изобретения. - 2003. - № 30.
9. Valitov R.A. The Development of the Oil and Gas Production Complex in the Far East of Russia Potentiality / 7<sup>th</sup> Annual Event "Sakhalin Oil and Gas". - London, 2003.
10. Пат. № 2236286 РФ. Эмульгатор-стабилизатор инвертных эмульсий и способ его получения / А.Я. Соловьев, В.А. Благовещенский, В.А. Докичев, Р.А. Валитов и др.; Оpubл. 20.09. 2004 //Изобретения. - 2004. - № 26.