

На правах рукописи

Головкина Нина Николаевна

**МЕТОДИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ СТЕНОК СКВАЖИН В ПОРИСТЫХ
ГОРНЫХ ПОРОДАХ**

Специальность 25.00.15. - Технология бурения и освоения скважин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

УФА 2001

Работа выполнена на кафедре горной и прикладной механики
Уфимского государственного нефтяного технического университета
(УГНТУ)

Научный руководитель - заслуженный деятель науки РБ,
доктор технических наук,
профессор А.Н. Попов

Научный консультант - доктор технических наук
Ю.Г. Матвеев

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор И.Г. Юсупов

кандидат технических наук,
доцент Л.М. Левинсон

Ведущее предприятие – Башкирский научно-исследовательский и
проектный институт нефти (БашНИПИнефть)

Защита состоится 26 декабря 2001 года в 15 ч. 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.289.04 при Уфимском
государственном нефтяном техническом университете по адресу:
450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УГНТУ.

Автореферат разослан " _____ " ноября 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

Ю.Г. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Осложнения при бурении скважин снижают скорости их проходки и сопровождаются большими затратами средств на ликвидацию их последствий, а поэтому задачам прогнозирования и предупреждения осложнений уделяется исключительно большое внимание. Надежность решений задачи о прогнозировании осложнений зависит как от полноты и достоверности геологической информации о разрезе скважины, так и от уровня методического обеспечения прогнозирования.

Интервалы разреза, к которым приурочены осложнения при бурении, сложены, как правило, пористыми горными породами. Влияние пластового (порового) давления и пористости горных пород на их поведение при вскрытии скважиной очевидно и признается многими исследователями, но учет их влияния методически не проработан.

Методические разработки по прочностным расчетам стенок скважины выполнены, главным образом, для вертикальных скважин, тогда как все шире применяется бурение наклонных скважин и скважин, заканчиваемых горизонтальным участком ствола (горизонтальных скважин). Горизонтальные участки скважины принципиально отличаются от вертикальных тем, что напряженное состояние прилегающих к ним горных пород не осесимметрично относительно оси скважины. Горизонтальный участок ствола проводится преимущественно по продуктивному пласту, а поэтому вопросы профилактики осложнений непосредственно связаны с обеспечением высокого качества заканчивания скважин.

Работа проведена в связи с участием УГНТУ в выполнении подпрограммы "Топливо и энергетика" научно-технической программы Министерства образования Российской Федерации "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники".

Цель работы. На основании аналитических и экспериментальных исследований особенностей напряженного состояния пористых горных пород в услови-

ях залегания и после вскрытия скважиной усовершенствовать методы расчета предельных давлений бурового раствора в вертикальной и горизонтальной скважинах из условий сохранения стенок в упругом состоянии и предупреждения открытия поглощения в результате гидроразрыва.

Основные задачи исследований:

- 1) аналитическое изучение напряженного состояния скелета пористой горной породы в условиях залегания и после вскрытия скважиной;
- 2) обоснование использования предела текучести по штампу с учетом масштабного эффекта для построения предельных зависимостей горных пород;
- 3) совершенствование методов расчета предельных давлений в вертикальной и горизонтальной скважинах с заданной вероятностью из условия сохранения стенок в упругом состоянии и предупреждения открытия поглощения;
- 4) разработка способа определения коэффициента бокового распора горных пород по данным испытаний скважин на гидроразрыв.

Методы решения поставленных задач. Решение задач выполнено аналитически с постановкой (проведением) специально поставленных экспериментов и привлечением опубликованных в печати результатов испытаний горных пород в условиях всестороннего сжатия, в т. ч. на моделях скважины, а также результатов промысловых испытаний скважин на гидроразрыв.

Научная новизна. Уточнено математическое описание напряженного состояния скелета пористых горных пород в условиях залегания и в стенках вертикальных и горизонтальных скважин с учетом проницаемости стенок, установлен характер зависимости доли скелета в опасных сечениях породы от величины полной пористости. Уточнен характер влияния масштабного эффекта на предел текучести горных пород при вдавливании и метод его использования для построения предельных зависимостей по теории прочности Мора-Кулона. Выведены расчетные формулы для определения с заданной вероятностью предельных давлений в вертикальных и горизонтальных скважинах из условий сохранения стенок в упругом состоянии и предупреждения открытия поглощения

бурового раствора в результате гидроразрыва. Обоснован метод определения коэффициента бокового распора по данным испытаний скважин на гидроразрыв.

Основные защищаемые положения:

1) уточненное математическое описание напряженного состояния скелета горной породы в условиях залегания и в стенках скважины на основании модели пористой горной породы с учетом проницаемости стенок;

2) результаты изучения масштабного эффекта при вдавливании штампа и уточнение метода использования результатов вдавливания для построения предельной зависимости по теории прочности Мора-Кулона;

3) обоснование необходимости расчета области предельных давлений в скважине и формулы для их расчета с заданной вероятностью из условий сохранения стенок в упругом состоянии;

4) результаты анализа особенностей напряженного состояния стенок горизонтальной и наклонной скважин и рекомендации по минимизации осложнений в процессе бурения, связанных с разрушением стенок;

5) способ определения коэффициента бокового распора горных пород по результатам испытаний пластов на гидроразрыв и уточненный метод прогнозирования давления открытия поглощения в результате гидроразрыва.

Практическая ценность и реализация работы. Основную ценность составляют уточненные расчетные формулы для определения предельных давлений бурового раствора в вертикальных и горизонтальных скважинах, методы определения коэффициента бокового распора и прогнозирования давления открытия поглощения с заданной вероятностью по промысловым данным. Результаты исследований вошли в учебное пособие для студентов вузов «Прочностные расчеты стенок скважины в пористых горных породах». - Уфа: УГНТУ, 2001 (авторы А.Н. Попов и Н.Н. Головкина). Результаты работы используются также при подготовке и переподготовке инженеров-буровиков в институте повышения квалификации УГНТУ.

Результаты работы докладывались на:

1) Всероссийской научно-практической конференции по проблемам породоразрушающего бурового инструмента. – Самара, 1999;

2) Втором Международном симпозиуме «Наука и технология углеводородных дисперсных систем». Секция «Бурение нефтяных и газовых скважин, добыча нефти и газа». – Уфа, 2000;

3) V Международном научном симпозиуме им. Академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», посвященном 100-летию ТПУ. Секция «Бурение». – Томск, 2001;

4) Третьем Конгрессе нефтепромышленников России. Секция «Проблемы нефти и газа». Подсекция «Бурение нефтяных и газовых скважин». – Уфа, 2001;

5) Всероссийской научно-практической конференции по проблемам породоразрушающего бурового инструмента. – Самара, 2001;

6) Научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. Секция «Бурение нефтяных и газовых скважин». – Уфа, 1999 – 2001.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе одно учебное пособие, пять статей и три доклада.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6-ти глав, основных выводов и рекомендаций, библиографического списка и двух приложений.

Общий объем 164 страницы и включает 25 рисунков, 21 таблиц и библиографический список 123 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе дан обзор современного состояния методического обеспечения прочностных расчетов стенок скважин из условий предупреждения осложнений и поставлены задачи исследований.

Исследованиям механических процессов в горных породах применительно к нефтяным и газовым скважинам в связи с осложнениями при бурении, посвящены работы М.Т. Алимжанова, Б.В. Байдюка, В.Ф. Буслаева, В.С. Войтенко, Р.М. Гилязова, А.Г. Калинина, В.И. Крылова, Л.М. Левинсона, Е.Г. Леонова, С.Г. Лехницкого, Р.Р. Лукманова, А.Н. Попова, Н.Р. Рабиновича, В.Х. Самигуллина, М.К. Сеид-Рза, А.П. Сельващука, Г.А. Семенычева, Л.Е. Симонянца, А.И. Спивака, А.Н. Ставрогина, Н.С. Тимофеева, Т.Г. Фараджева, М.Д. Фаталиева, З.М. Шахмаева, Л.А. Шрейнера, Р.С. Яремийчука и многих других.

В выполненных исследованиях и разработанных методиках расчета не уделено достаточного внимания влиянию пористости горных пород, статистических характеристик показателей их механических свойств, выбору теории прочности, состоянию стенки скважины и определению такой важнейшей характеристики, как коэффициент бокового распора. Противоречивые результаты получены при изучении влияния масштабного эффекта на сопротивление горных пород разрушению. Особенности прочностных расчетов стенок горизонтальных и наклонных скважин практически не исследованы.

Второй раздел содержит уточнение описания модели пористой горной породы в условиях залегания и в стенке скважины. Для условий бурения скважин рассматривается дырчатая модель пористой горной породы, в элементах скелета которой породы действуют вертикальные σ_3 и горизонтальные σ_1 напряжения, зависящие как от геостатического p_2 и пластового p_n давлений, так и от размеров сечения скелета. Для характеристики сечения скелета введено понятие доля площади s опасного сечения горной породы, занятая скелетом, которую для краткости названа долей скелета.

Известно, что вертикальные напряжения в скелете горной породы σ_3 равны

$$\sigma_3 = \frac{p_z - p_n(1-c)}{c} = \sigma_{max} - \frac{p_n(1-c)}{c} \quad (1)$$

При определении горизонтальных напряжений σ_l в скелете уравнение (1) представлено в виде двух слагаемых:

$$\sigma_3 = p_n + \frac{p_z - p_n}{c} \quad (2)$$

и рассмотрено в соответствии с принципом независимости действия сил. Первое слагаемое соответствует равенству пластового и геостатического давлений и обуславливает напряжение σ_l' , а второе слагаемое предполагает отсутствие давления флюида в порах и обуславливает напряжение σ_l'' . Окончательное решение

$$\sigma_l = \sigma_l' + \sigma_l'' = \lambda p_z + p_n(1-c)(1-\lambda). \quad (3)$$

При вскрытии скважиной наибольшее изменение напряженного состояния имеет место в горных породах стенки. В случае непроницаемой стенки формулы С.Г. Лехницкого для горной породы стенки ($r = r_c$) приняли вид

$$\sigma_z = \sigma_3; \quad (4)$$

$$\sigma_R = p_n + (p_c - p_n)/c; \quad (5)$$

$$\sigma_t = 2\sigma_l - \sigma_R, \quad (6)$$

где σ_z , σ_R и σ_t - вертикальная, радиальная и тангенциальная компоненты напряжений в скелете стенки скважины соответственно; p_c - давление бурового раствора в скважине на рассматриваемой глубине z .

В случае проницаемой стенки скважины компоненты напряжений в горной породе стенки отличаются от компонент, определяемых по формулам (4), (5) и (6), на величину $\Delta\sigma$:

$$\Delta\sigma = \frac{(p_c - p_n)(1-c_0)}{c},$$

где c_0 - условная доля скелета опасного сечения горной породы, рассчитанная по открытой пористости. Тогда

$$\sigma_z = \frac{\sigma_3 - (p_c - p_n)(1 - c_0)}{c}; \quad (7)$$

$$\sigma_R = p_n + (p_c - p_n) \frac{c_0}{c}; \quad (8)$$

$$\sigma_t = 2\sigma_l - \frac{1}{c} [p_c(2 - c_0) + p_n(2 - c_0 - c)]. \quad (9)$$

Для проверки принятых допущений использованы данные об испытаниях скважин на открытие поглощения (гидроразрыв) на месторождениях Восточной Украины, опубликованные А.П. Сельващук и др. Известно, что давление гидроразрыва p_{zp} от p_z и p_n описываются уравнением вида

$$p_{zp} = A p_z + B p_n, \quad (10)$$

где A и B - параметры уравнения.

Рассмотрено аналитическое определение параметров A и B уравнения (10) из условия, чтобы в скелете стенок скважины не возникали растягивающие тангенциальные напряжения, т.е. $\sigma_t \leq 0$. Тогда в случае непроницаемой стенки скважины

$$A = 2c\lambda; \quad (11)$$

$$B = (1 - c)[2c(1 - \lambda) + 1], \quad (12)$$

а в случае проницаемой стенки скважины

$$A = \frac{2c\lambda}{2 - c_0}; \quad (13)$$

$$B = \frac{2c(1 - c)(1 - \lambda) + 2 - c - c_0}{2 - c_0}. \quad (14)$$

Сопоставление результатов расчетов с промысловыми данными показало, что решения о напряженном состоянии скелета горной породы в стенке скважины позволяют аналитически определить параметры A и B и, следовательно, принятые допущения не противоречат результатам промысловых испытаний.

Разрушение стенок скважины начинается в интервале пласта, где его характеристики имеют наихудшее сочетание. В частности, для зарождения трещины гидроразрыва коэффициент бокового распора и доля скелета должны

быть наименьшими. Наименьшей доле скелета соответствует наибольшая пористость породы. Но такое сочетание λ и m маловероятно.

В бурении уровень значимости принимается равным $q = 0,025$. В ответственных случаях уровень значимости может быть принят равным 0,005.

Для λ в физике пласта рекомендуется нормальный, а для m – как нормальный, так и логарифмически нормальный закон распределения.

В случае нормального закона распределения

$$\lambda_p = \bar{\lambda} - t \cdot s_\lambda; \quad (15)$$

$$m_p = \bar{m} + t \cdot s_m, \quad (16)$$

где $\bar{\lambda}$ и \bar{m} – средние арифметические значения коэффициента бокового распора и пористости; s_λ и s_m – их средние квадратические отклонения.

Граничные условия (при $m = 0 \quad c = 1$; при $m \rightarrow 1 \quad c \rightarrow 0$) дают основание искать зависимость c от m в виде экспоненты. В результате анализа опубликованных данных о давлениях гидроразрыва на месторождениях Восточной Украины получено, что

$$c = \exp(-19,1m^2), \quad (17)$$

где m – пористость в долях единицы.

В третьем разделе приведены результаты экспериментального изучения проявления масштабного эффекта при определении предела текучести горных пород по штампу применительно к расчету предельных зависимостей горных пород по обобщенному условию прочности Мора и теории Мора-Кулона. Опыты проведены на блоках мрамора, известняка, песчаника и каменной соли. Вдавливались штампы диаметром от 1,5 до 16 мм на установках УМГП-3 и RMS фирмы SCHENCK TREBEL, рассчитанной на нагрузки от 0 до 100 кН. Методическими опытами подтверждено, что распределение предела текучести по штампу не противоречит нормальному закону, и показана необходимость на каждом уровне проводить не менее пяти измерений. Изучение проведено в два этапа. На первом этапе с использованием метода сравнения средних и t -критерия Стьюдента была подтверждена статистическая значимость влияния

диаметра штампа d на величину предела текучести горных пород p_0 . На втором этапе проведено изучение зависимостей p_0 от d . Установлено, что эта зависимость адекватно описывается полиномом (уравнением регрессии)

$$p_0 = p_{0\infty} + A_1 \frac{1}{d} + A_2 \frac{1}{d^2} + \dots + A_n \frac{1}{d^n} \quad (18)$$

с показателем степени n , равным двум или трем, при общем коэффициенте корреляции не ниже 0,92.

Независимой от диаметра штампа количественной характеристикой предела текучести горных пород является величина $p_{0\infty}$ (асимптота зависимости p_0 от $1/d$). Однако при определении $p_{0\infty}$ необходимо прибегать к экстраполяции зависимости p_0 от $1/d$, что может привести к значительным погрешностям.

Стандартным при испытании на одноосное сжатие является диаметр образцов горных пород 42...50 мм. Поэтому применительно к расчету стенок скважины величину предела текучести по штампу целесообразно приводить к диаметру индентора 50 мм. Т.к. испытания кернов горных пород при диаметрах штампа 50 мм невозможны, то предлагается следующий метод приведения.

Обработка экспериментов показала, что зависимости p_0 от $1/d$ имеют экстремум (максимум) в диапазоне изменения диаметра штампа от 2 до 4 мм. Это максимальное значение предела текучести предлагается использовать в качестве вспомогательного показателя p_{0m} . Результаты измерений предела текучести были представлены в относительном виде ($p_0' = p_0 / p_{0m}$) и было установлено, что $p_{0\infty}'$ коррелирует с величиной p_{0m} :

$$p_{0\infty}' = 0,263 \exp(-0,0004 p_{0m}). \quad (19)$$

Коэффициент корреляции при этом составил 0,97.

Для получения зависимости (18) следует определить пределы текучести горной породы при диаметрах штампа от 1,5 до 5,0 мм, получить предварительную зависимость p_0 от x ($x = 1/d$), рассчитать p_{0m} и далее по (19) - $p_{0\infty}$.

И, наконец, поставив условие, чтобы линия регрессии проходила через точку с координатами $x = 0$ и $p_0 = p_{0\infty}$, получить искомое уравнение регрессии и рассчитать p_{050} при $d = 50$ мм.

Известно, что при вдавливании штампа предел текучести горной породы фиксируется в конце формирования области предельного состояния, которая замыкается под штампом на глубине z_3 , и обуславливает кажущееся изменение коэффициента Пуассона. Анализом экспериментальных данных Л.А. Шрейнера, Б.В. Байдюка и др. показано, что существует некоторое эквивалентное значение коэффициента Пуассона, которому соответствуют координаты предельных зависимостей, рассчитываемые по величине предела текучести по штампу.

В четвертом разделе выведены формулы для расчета предельных давлений в вертикальной скважине из условия упругого состояния стенок и проведена их проверка по стендовым экспериментальным данным, приведенным в работах Н.С. Тимофеева и др.

Условие упругого состояния в соответствии с теорией Мора-Кулона

$$|\tau_{max}| \leq k_{dl} |\tau_s|, \quad (20)$$

где τ_{max} - действующие в стенке скважины максимальные касательные напряжения; τ_s - касательные напряжения, соответствующие пределу текучести горной породы; k_{dl} - коэффициент длительной прочности. Зависимость τ_s от среднего нормального напряжения σ_{cp} принимается линейной

$$\tau_s = \tau_0 + A \cdot \sigma_{cp}, \quad (21)$$

где τ_0 - условное сопротивление сдвигу горной породы при $\sigma_{cp} = 0$; A - угловой коэффициент, зависящий от внутреннего трения в горной породе.

В случае нелинейной зависимости τ_s от σ_{cp} ее следует заменить линейной на расчетном участке значений σ_{cp} . При определении предельных давлений в скважине p_s с использованием теории прочности Мора-Кулона необходимо выполнить три расчета при $\tau_{max} = k_{dl} \tau_s$:

- 1) в случае $|\sigma_z| > |\sigma_t| > |\sigma_R|$ рассчитывается нижнее предельное давление p_{s1} ;
- 2) в случае $|\sigma_t| > |\sigma_z| > |\sigma_R|$ рассчитывается нижнее предельное давление p_{s2} ;

3) в случае $|\sigma_z| > |\sigma_R| > |\sigma_l|$ рассчитывается верхнее предельное давление p_{se} .

Из двух полученных значений p_{s1} и p_{s2} выбирается алгебраически большее и принимается в качестве расчетного нижнего предельного давления p_{sn} .

Окончательно условие упругого состояния стенок скважины примет вид

$$p_{sn} \leq p_c \leq p_{se}.$$

Расчетные формулы для рассматриваемых случаев следующие:

$$p_{s1} = p_n(1 - c) + [c\sigma_3(1 - k_{\partial l}A) - 2k_{\partial l}\tau_0]/(1 + k_{\partial l}A); \quad (22)$$

$$p_{s2} = p_n(1 - c) + c\sigma_1(1 - k_{\partial l}A) - k_{\partial l}\tau_0; \quad (23)$$

$$p_{s3} = p_n(1 - c) + 2c\sigma_1 + [2k_{\partial l}\tau_0 - c\sigma_3(1 - k_{\partial l}A)]/(1 + k_{\partial l}A). \quad (24)$$

Расчеты по формулам (22), (23), (24) выполняются на момент вскрытия горной породы скважиной, для которого принимается $k_{\partial l} = 1$, и на ожидаемое снижение прочности к моменту времени t . При отсутствии данных об ожидаемом снижении прочности расчет выполняется для условия $k_{\partial l} = k_{\partial l\infty}$.

В работе Н.С. Тимофеева и др. приведены данные об испытании полых образцов семи горных пород, отличающихся по свойствам и литологии. При этом моделировались геостатическое, боковое давление и давление бурового раствора в скважине. Основным аргументом было геостатическое давление, а измеряемой величиной деформация внутренней полости образца горной породы. Нарушение линейной зависимости между геостатическим давлением и названной деформацией фиксировалось как достижение предельного состояния горной породы на стенке модели скважины.

Анализ результатов испытаний с использованием формул (22), (23), (24), а также с использованием обобщенного условия прочности Мора показал, что верхние предельные давления, рассчитанные по обеим теориям прочности, монотонно уменьшаются с глубиной, а величины относительных p_{sn} монотонно возрастают. Расчеты, выполненные с использованием теории Мора-Кулона, лучше согласуются с экспериментальными данными в отличие от расчетов, выполненных с использованием обобщенного условия прочности Мора. Экспериментальные точки, полученные для малых и средних моделируемых глубин

скважин, совпадают с p_{sh} , а для больших глубин – с p_{sb} . Однако различия в характере разрушения стенок скважины не было замечено. Это свидетельствует о необходимости расчета как p_{sh} , так и p_{sb} , что в принятых методиках расчета не предусмотрено.

Расчеты по формулам (22), (23), (24) показали, что область упругого состояния стенки скважины по мере уменьшения коэффициента длительной прочности сужается и зависимости p_{sh} и p_{sb} от k_{dl} могут пресекаться. Правее точки пересечения этих зависимостей упругое состояние породы в стенке скважины невозможно при любой плотности бурового раствора. Сопоставление результатов расчета для глины с результатами расчета для аргиллита, принципиально отличающихся величиной коэффициента бокового распора, показывает, что ордината точек пересечения зависимостей p_{s1} и p_{s3} от k_{dl} тем больше, чем больше коэффициент бокового распора.

Примеры расчетов показали, что предлагаемые расчетные формулы для пористых горных пород позволяют проанализировать влияние основных факторов, определяющих упругое напряженное состояние. При разработке надежной методики определения параметра c эти формулы позволят решать не только качественные, но и количественные задачи технологии бурения скважин.

В пятом разделе рассмотрены вопросы построения предельной зависимости τ_s от σ_{cp} и расчета области предельных давлений с заданной вероятностью как для вертикальных, так и для горизонтальных скважин для случаев непроницаемой (закольматированной) и проницаемой стенок.

При построении предельных зависимостей уровень значимости принят равным 0,025. Величины τ_s и σ_{cp} соответственно равны :

при одноосном сжатии

$$\tau_s = \sigma_{сж} / 2; \sigma_{cp} = \sigma_{сж} / 2; \quad (25)$$

при вдавливании штампа

$$\tau_s = k_1 p_0; \sigma_{cp} = k_2 p_0 . \quad (26)$$

Аналитическое описание зависимостей k_1 и k_2 от коэффициента Пуассона μ с учетом его эквивалентного значения весьма громоздки. Для упрощения расчетов зависимости k_1 и k_2 от $\mu_{сж}$ заменены приближенными формулами

$$k_1 = 0,348 - 0,114\mu_{сж}; \quad (27)$$

$$k_2 = 0,508 + 0,030\mu_{сж} - 0,0203\mu_{сж}^2. \quad (28)$$

Для обеих формул коэффициенты корреляции выше 0,99. В формулы (27) и (28) рекомендуется подставлять средние арифметические значения коэффициента Пуассона при одноосном сжатии.

Параметр A уравнения (21) предложено рассчитывать по средним арифметическим значениям предела прочности на одноосное сжатие и предела текучести горной породы по штампу, приведенному к диаметру 50 мм.

Возможность выхода стенки скважины из упругого состояния тем выше, чем меньше прочность породы. Поэтому параметр τ_0 определяется по нижним значениям показателей $p_{0н}$, $\sigma_{сж.н}$. Из двух значений τ_0 выбирается меньшее.

Расчет области предельных давлений ведется относительно слабого сечения горной породы, поэтому принимаем верхнее значение пористости, которому соответствует нижнее значение доли скелета. Из формул (22), (23) следует, что в них должны подставляться верхние значения $\sigma_{1в}$, рассчитанные по верхнему значению коэффициента бокового распора, а в формулу (24) - $\sigma_{1н}$, рассчитанные по нижнему значению коэффициента бокового распора.

В работе для случая проницаемых стенок скважины получены соответствующие формулы, но нетрудно видеть, что величина максимальных касательных напряжений в стенке скважины не зависит, а величина среднего нормального напряжения зависит от проницаемости стенки скважины.

Следовательно, влияние проницаемости стенки скважины будет проявляться через снижение прочностной характеристики горной породы τ_s , т. к. в случае проницаемой горной породы

$$\tau_s = \tau_0 + A(\sigma_{ср} - \Delta\sigma) = \tau_0 + A\sigma_{ср} - A\Delta\sigma. \quad (29)$$

Для количественной оценки проведен сравнительный расчет предельных давлений в скважине для случаев непроницаемой и проницаемой стенок скважины, который показал, что влияние проницаемости, в основном, не выходит за пределы точности расчета.

Напряженное состояние горных пород, вскрытых горизонтальной скважиной, в отличие от вскрытых вертикальной, не является осесимметричным. Вывод расчетных формул выполнен в цилиндрической системе координат: аппликата z совпадает с осью скважины, r и φ - полярные радиус и угол соответственно. Компоненты напряжений σ_r , σ_t и σ_z являются функциями естественных напряжений - вертикального σ_3 , горизонтального σ_1 , пластового давления p_n , а также параметров, связанных со скважиной: давления бурового раствора p_c в скважине, полярных радиуса r и угла φ .

Влияние давления в горной выработке на напряженное состояние пород не зависит от положения выработки (скважины) в пространстве, поэтому в соответствии с принципом независимости действия сил поиск решения о компонентах напряжений проведен в виде сумм:

$$\sigma_R = \sigma_{r0} + \sigma_{rp}; \quad (30)$$

$$\sigma_t = \sigma_{t0} + \sigma_{tp}. \quad (31)$$

В окончательном виде расчетные формулы принимают вид

$$\sigma_r = \left(1 - \frac{1}{r_0^2}\right) \left(\frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} - \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} - \left(1 - \frac{3}{r_0^2}\right) \cos 2\varphi\right) + \frac{\sigma_R}{r_0^2}; \quad (32)$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} \left(1 + \frac{1}{r_0^2}\right) + \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \left(1 + \frac{3}{r_0^4}\right) \cos 2\varphi - \frac{\sigma_R}{r_0^2}, \quad (33)$$

где σ_{rp} и σ_{tp} - напряжения в горной породе, окружающей скважину, создаваемые только давлением p_c ; σ_R - напряжения в скелете стенки скважины; r_0 - относительный полярный радиус, равный $r_0 = r/r_c$, где r_c - радиус скважины.

Компонента σ_z (продольные напряжения) определяется из условия невозможности деформирования горных пород в направлении оси z .

Из формул (32) и (33) следует, что наибольшее и наименьшее значения σ_r и σ_t принимают при горизонтальном и вертикальном положениях полярного радиуса. По мере удаления от стенки скважины, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях, в зависимостях σ_r от r_0 наблюдаются экстремумы на расстоянии менее $0,5r_c$, а затем величины σ_r асимптотически приближаются к σ_1 и σ_3 соответственно.

В вертикальном направлении вблизи стенки тангенциальные напряжения могут быть как сжимающими, так и растягивающими. В случае растягивающих σ_t по мере увеличения расстояния от стенки их величина быстро снижается, переходит через нуль и становится сжимающей. Из формул следует (31) и (33) следует, что с ростом давления жидкости в скважине вероятность появления и величины растягивающих напряжений увеличиваются.

Анализ распределения напряжений в стенках горизонтальной скважины показал, что расчетные напряжения можно определять только при $\varphi = 0^\circ$ (на боковой стенке) и при $\varphi = 90^\circ$ (на верхней стенке), т.к. при других значениях полярного угла компоненты напряжений принимают промежуточные значения.

Для боковой непроницаемой стенки предельные давления равны

$$p_{s1} = p_n(1 - c) + [c(1 - k_{\partial n}A)(\sigma_1 + 2\mu(\sigma_3 - \sigma_1)) - 2k_{\partial n}\tau_0]/(1 + k_{\partial n}A); \quad (34)$$

$$p_{s2} = p_n(1 - c) + 0,5c(1 - k_{\partial n}A)(3\sigma_3 - \sigma_1) - k_{\partial n}\tau_0; \quad (35)$$

$$p_{s3} = p_n(1 - c) + 3c\sigma_3 + 2[k_{\partial n}\tau_0 - c\mu(\sigma_3 - \sigma_1)(1 - k_{\partial n}A) - c\sigma_1]/(1 + k_{\partial n}A). \quad (36)$$

Из двух полученных по формулам (34) и (35) значений выбирается алгебраически большее и принимается в качестве расчетного p_{sn} , а $p_{se} = p_{s3}$.

Для верхней стенки

$$p_{s1} = p(1 - c) + \{c(1 - k_{\partial n}A)[\sigma_1 - 2\mu(\sigma_3 - \sigma_1)] - 2k_{\partial n}\tau_0\}/(1 + k_{\partial n}A); \quad (37)$$

$$p_{s2} = p_n(1 - c) + 0,5c(1 - k_{\partial n}A)(3\sigma_1 - \sigma_3) - k_{\partial n}\tau_0; \quad (38)$$

$$p_{s3} = p_n(1 - c) - c\sigma_3 + \{2[k_{\partial n}\tau_0 + c\sigma_1(1 + 2k_{\partial n}A) + 2c\mu(\sigma_3 - \sigma_1)(1 - k_{\partial n}A)]\}/(1 + k_{\partial n}A). \quad (39)$$

Решение о величине p_{sn} принимается аналогично.

Как и в случае вертикальной скважины, при расчете величин p_{s1} и p_{s2} в формулы подставляется верхнее значение горизонтальных напряжений в скелете, т.е. $\sigma_{1\theta}$, а при расчете $p_{s3} = p_{s\theta}$ – нижнее значение σ_{1H} .

Вертикальная и горизонтальная скважины, с точки зрения напряженного состояния горных пород в стенках, являются частными случаями наклонной скважины, характеризующейся углом искривления α . Для вертикальной скважины $\alpha = 0^\circ$, а для горизонтальной - $\alpha = 90^\circ$. Поэтому решение о напряженном состоянии горных пород должно содержать в себе решения как для вертикальной, так и для горизонтальной скважин. Тогда для горной породы стенки

$$\begin{aligned}\sigma_{z\alpha} &= \sigma_{z\theta} \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_{z2} \cdot \sin^2 \alpha; \\ \sigma_{t\alpha} &= \sigma_{t\theta} \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_{t2} \cdot \sin^2 \alpha - \sigma_R; \\ \sigma_{r\alpha} &= \sigma_R,\end{aligned}\tag{40}$$

где $\sigma_{z\theta}$ и $\sigma_{t\theta}$, σ_{z2} и σ_{t2} - компоненты напряжений в стенке скважины, рассчитанные по формулам для вертикальной скважины и горизонтальной скважины соответственно при $p_c = 0$.

При бурении горизонтальных и наклонных скважин растягивающие напряжения в горных породах верхней и нижней стенок благоприятствуют таким осложнениям, как желобообразование и образование дополнительного количества шлама на нижней стенке за счет ее разрушения бурильным инструментом. Эти явления особенно характерны для горных пород с низким и средним значением коэффициента бокового распора. Появление растягивающих напряжений в таких горных породах можно предупредить заменой горизонтального участка ствола скважины наклонным с углом искривления меньшим критического

$$\alpha_k = \arcsin [(\sigma_{t\theta} - \sigma_R) / (\sigma_{t\theta} - \sigma_{tr})]^{0,5},\tag{41}$$

где α_k – критический угол искривления скважины, при превышении которого в стенке скважины σ_t меняет знак и становится растягивающим.

Максимальное давление p_{ck} в скважине, при котором в стенках отсутствуют растягивающие напряжения, можно определить по формуле

$$p_{ck} = c\sigma_{t2} + p_n(1 - c),\tag{42}$$

При превышении $p_{ск}$ в горных породах стенки будут иметь место растягивающие напряжения.

Анализ особенностей напряженного состояния горных пород вокруг горизонтальной скважины показал, что наиболее опасным с точки зрения гидроразрыва является вертикальное направление. Получена следующая формула для расчета давления гидроразрыва из условия его предупреждения

$$p_{эр.в} = 0,5c(\sigma_3 + 3\sigma_{1н}) + p_n(1 - c), \quad (43)$$

где $p_{эр.в}$ – расчетное давление гидроразрыва в вертикальном направлении

Формула (43) применима при непроницаемой (закольматированной) стенке скважины. Гипотеза, положенная в основу этой формулы, требует экспериментальной промысловой проверки.

В шестом разделе приведены результаты разработки методов определения коэффициента бокового распора и прогнозирования открытия поглощения с заданной вероятностью в результате гидроразрыва.

Полученные аналитические зависимости (11) и (12) для определения параметров уравнения (10) позволили решить задачу об определении коэффициента бокового распора по данным измерений давления гидроразрыва. Для этого по выборке вертикальных скважин необходимо определить статистические характеристики входящих в названные зависимости параметров. Вначале по каждой скважине найти расчетное значение λ_p по формуле

$$\lambda_p = \frac{p_{эр} - p_n(1 + c_p - 2c_p^2)}{2c_p(p_э - p_n + cp_n)}. \quad (44)$$

В формуле (44) c_p определена по результатам определения пористости в каждой скважине, по которым определена соответствующая величина m_p :

$$m_p = \bar{m} + 1,03 s_m,$$

где \bar{m} и s_m – среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонение полной пористости в долях единицы. Значения λ_p по каждой скважине рассматриваются как члены вариационного ряда, для которого определяются его характеристики и коэффициент вариации w_p .

Определение характеристик коэффициента бокового распора проводится при допущении, что коэффициенты вариации расчетных значений λ_p и значений коэффициента бокового распора λ равны, т.е. $w_p = w$. Тогда

$$\bar{\lambda} = \frac{\overline{\lambda_p}}{1 - tw_p}; \quad s_\lambda = \bar{\lambda} w_p,$$

где t - параметр распределения Стьюдента.

Рассмотренный способ определения коэффициента бокового распора разработан в соавторстве с Р.А. Исмаковым, А.Н. Поповым и М.А. Поповым и оформлен в виде заявки на изобретение (заявка № 2000115089/03/(014830) от 20 мая 2000 г.).

С точки зрения предупреждения поглощения основной интерес представляют не средние значения, а нижняя граница давлений гидроразрыва с заданной вероятностью. Для этого в формулы для определения параметров уравнения (10) предлагается подставлять прогнозные значения доли скелета и коэффициента бокового распора, определяемые по первым пробуренным скважинам,

$$c_n = \bar{c} - s_c t_n; \quad (45)$$

$$\lambda_n = \bar{\lambda} - s_\lambda t_n, \quad (46)$$

где t_n – параметр нормального распределения. Анализ промысловых данных показал, что следует принять $t_n = 1,51$.

Проверка корректности предлагаемого метода определения зависимости $p_{гр.н}$ от p_n , проведенная относительно данных А.П. Сельващука и др. об испытаниях продуктивных пластов Ефремовского месторождения на гидроразрыв, показала, что отклонения не превышают 3% и свидетельствует о достаточно высокой точности прогнозирования.

Заключение

Выполненные исследования представляют собой научно обоснованные технологические разработки, обеспечивающие решение важных прикладных задач совершенствования расчетных методов определения предельных давлений в вертикальных и горизонтальных скважинах из условий упругого состоя-

ния их стенок и предупреждения открытия поглощения в результате гидроразрыва. Новые результаты получены за счет уточнения расчета параметров модели пористой горной породы, использования уточненных статистических упругих и прочностных характеристик пород и учета проницаемости стенок скважины.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Уточнено и проверено по промысловым данным математическое описание компонент естественных напряжений в скелете горной породы как в условиях залегания, так и в стенке скважины, и установлен вид зависимости доли скелета от общей пористости горной породы в ее опасном сечении с точки зрения разрушения.

2. Экспериментально подтверждена статистическая значимость масштабного эффекта при определении предела текучести горных пород по штампу. Зависимость величины предела текучести по штампу от величины обратной диаметру штампа ($1/d$) адекватно аппроксимируется полиномами второй или третьей степени. В прочностных расчетах стенок скважины целесообразно использовать показатель предела текучести по штампу, приведенный к диаметру штампа $d = 50$ мм. Показана принципиальная возможность его определения по данным испытаний горных пород при вдавливании штампов диаметром от 1,5 до 5,0 мм.

3. Обоснована и подтверждена анализом экспериментальных данных других исследователей необходимость введения эквивалентного значения коэффициента Пуассона при использовании предела текучести по штампу для построения предельных зависимостей (паспортов прочности) по обобщенному условию прочности Мора и по теории прочности Мора-Кулона горных пород. Показано, что при прочностном расчете стенок скважины теория прочности Мора-Кулона предпочтительней обобщенного условия прочности Мора.

4. Характер разрушения горных пород стенок скважины при превышении в ней нижнего и верхнего предельных давлений, ограничивающих область упругого состояния стенок, принципиально не отличается, а поэтому при выборе плотности бурового раствора необходимо учитывать оба названных давления.

5. Снижение во времени прочности горных пород, слагающих стенки скважины, приводит к быстрому сужению области предельных давлений бурового раствора вплоть до пересечения зависимостей предельных давлений от коэффициента длительной прочности. Абсцисса точки пересечения соответствует допустимой величине снижения прочности горной породы, обеспечивающей ее упругое состояние.

6. Уточнены формулы для расчета предельных давлений в вертикальных и горизонтальных скважинах из условия сохранения стенок в упругом состоянии с заданной вероятностью для случаев непроницаемой и проницаемой стенок скважины.

7. Показаны особенности возникновения растягивающих напряжений в стенках горизонтальных и наклонных скважин и предложены формулы для расчета условий их предупреждения. Показано, что предупредить появление растягивающих напряжений в стенках наклонной скважины можно путем ограничения угла ее искривления.

8. Предложен и обоснован способ определения статистических характеристик коэффициента бокового распора по данным испытаний пластов на гидроразрыв в комплексе с определением пластового и геостатического давлений и геофизическими исследованиями по определению пористости горных пород и проницаемости стенок скважины.

9. Уточнены методы расчета давления открытия поглощения в результате гидроразрыва на основании определения прогнозного значения коэффициента бокового распора по данным испытаний на гидроразрыв первых пробуренных на месторождении скважин, и статистических характеристик пористости слагающих пласт горных пород.

10. Результаты исследований, выполненных при работе над диссертацией, существенно расширяют современные представления о механических процессах в пористых горных породах при вскрытии их скважинами и возможности расчетных методов прогнозирования осложнений при бурении. Они вошли в учебное пособие "Прочностные расчеты стенок скважины в пористых горных породах" (авторы А.Н. Попов и Н.Н. Головкина) для студентов-буровиков и слушателей ИПК.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Попов А.Н., Головкина Н.Н. Прочностные расчеты стенок скважины в пористых горных породах: Учебное пособие для студентов вузов. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. – 70 с.
2. Попов А.Н., Спивак А.И., Попов М.А., Головкина Н.Н. Определение прочностных характеристик горных пород с учетом масштабного эффекта // Научно-технические достижения и передовой опыт в нефтегазовой промышленности: Сб. науч. тр. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. – С.95 – 101.
3. Попов А.Н., Головкина Н.Н. Модель пористой горной породы для расчета компонент напряжений на стенках скважины и давления их самопроизвольного разрыва в процессе бурения // Известия вузов. Нефть и газ. – 1999. - №5 - С.29 -34.
4. Попов А.Н., Головкина Н.Н. Определение доли площади скелета по промышленным данным для прочностных расчетов стенки скважины // Второй международный симп. «Наука и технология углеводородных дисперсных систем»: Сб. науч. тр. - Уфа: Изд. «Реактив», 2000. – С.124 –126.
5. Головкина Н.Н. Особенности масштабного эффекта. // V Международный науч. симп. им. Академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр»: Сб. докл. – Томск: ТПУ, 2001. – С. 114 – 116.

6. Попов А.Н., Головкина Н.Н. Особенности напряженного состояния горных пород в окрестности горизонтальной скважины // Третий конгресс нефтепромышленников России. Секция Н «Проблемы нефти и газа»: Науч. тр. – Уфа: Изд. «Реактив», 2001. – С. 97 – 98.
7. Головкина Н.Н. Прочностные характеристики горных пород с учетом масштабного эффекта // Третий конгресс нефтепромышленников России. Секция Н «Проблемы нефти и газа»: Науч. тр. – Уфа: Изд. «Реактив», 2001. – С. 99 – 100.
8. Попов А.Н., Головкина Н.Н., Попов М.А. Предупреждение разрушения стенок горизонтальной скважины под действием растягивающих напряжений // Актуальные проблемы проектирования, производства и эксплуатации изделий машиностроения: Сб. докл. Всеросс. науч.- техн.конф. - Самара: УГЛ СФМГУП, 2001. – С. 150 - 153.
9. Попов А.Н., Исмаков Р.А., Головкина Н.Н. Расчет условий упругого состояния стенок горизонтальной скважины // Актуальные проблемы проектирования, производства и эксплуатации изделий машиностроения: Сб. докл. Всеросс. науч.- техн.конф. - Самара: УГЛ СФМГУП, 2001. – С. 153 – 158.

Соискатель

Н.Н. Головкина