

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав кафедрой БС  
\_\_\_\_\_ В.Д. Евсеев  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2010

Расчет и обоснование параметров цементирования скважин,  
выбор схемы цементирования  
Методические указания к выполнению практической работы №4 по  
дисциплине «Заканчивание скважин» для студентов специальности 130504  
«Бурение нефтяных и газовых скважин» очного обучения

Томск 2010

**Исходные данные: при выполнении работы использовать исходные данные курсового проекта по заканчиванию скважин.**

Различают 7 следующих способов цементирования скважин:

1. прямое одноступенчатое цементирование,
2. прямое двухступенчатое цементирование:
  - ступенчатое цементирование с разрывом во времени,
  - последовательное цементирование,
3. манжетное цементирование,
4. обратное цементирование,
5. цементирование встречными потоками,
6. цементирование с противодавлением на пласт,
7. цементирования хвостовиков и секций ОК.

Прямое одноступенчатое цементирование используют при малоразличающихся между собой градиентов гидроразрыва пород по всему разрезу скважины и их глубине до 3000 м.

Прямое двухступенчатое цементирование используется в глубоких скважинах, а также при наличии в верхней и нижней части разреза пород резко различающихся градиентами гидроразрыва пород.

Манжетное цементирование используют для исключения загрязнения высокопроницаемых пластов цементным раствором.

Обратное цементирование используется при наличии в разрезе пластов подверженных гидроразрыву, а также как ремонтно-восстановительный при обнаружении течи эксплуатационных колонн.

Цементирование встречными потоками используется при наличии в разрезе скважины проницаемых отложений с низкими пластовыми давлениями.

Цементирование с противодавлением на пласт применяется в тех случаях, когда после цементирования в нормальных условиях наблюдаются заколонные ГНВП.

Проектирование процесса цементирования начинают с выбора состава и определения свойств трех жидкостей используемых при цементировании – буферной, тампонажного раствора и продавочной жидкости. При определении плотности облегченного тампонажного раствора должно быть выполнено условие недопущения гидроразрыва пластов или поглощения раствора:

$$P_{ГСКП} + P_{ГДКП} \leq 0,95 P_{ПГ} \text{ или } P_{ГСКП} + P_{ГДКП} \leq 0,95 P_{ГР} \quad (1)$$

Где:  $P_{ГС}$  – гидростатическое давление в кольцевом пространстве, МПа;

$P_{ГДКП}$  – гидродинамические потери давления в кольцевом пространстве, МПа;

$P_{ПГ}$  – давление начала поглощения, МПа;

$P_{ГР}$  - давление гидроразрыва пород на забое скважины или в интервале пласта с наименьшим градиентом гидроразрыва, МПа;

В свою очередь  $P_{ГДКП} = (\lambda \cdot \rho_{срвз} \cdot v_{кп}^2 \cdot L \cdot 10^{-6}) / 2(D_{СКВ} \cdot k^{0,5} - d_{НЗ})$ , где:  $\lambda$  -

коэффициент гидравлического сопротивления, равный 0,035;  $\rho_{\text{срвз}}$  – средневзвешенная плотность растворов за колонной в конце продавки, кг/м<sup>3</sup>;  $v_{\text{кп}}$  – скорость восходящего потока за колонной в конце продавки, м/с;  $L$  – длина ствола, м;  $D_{\text{СКВ}}$  – диаметр ствола скважины, м;  $k$  – коэффициент кавернозности;  $d_{\text{н}}$  – наружный диаметр обсадной колонны, м.

После выбора трёх жидкостей, участвующих в процессе цементирования производят расчёт параметров цементирования. Схема расчёта зависит от принятого способа цементирования.

Расчёт начинают с определения объёмов буферной жидкости, тампонажного раствора и продавочной жидкости.

**Объём буферной жидкости** для цементирования эксплуатационной колонны зависит от времени контакта для эффективной очистки затрубного пространства и определяется как произведение:

$$V_{\text{БЖ}} = S_{\text{К}} v_{\text{ВП}} t \quad (2)$$

где:  $S_{\text{К}} = \pi (D_{\text{СКВ}}^2 k - d_{\text{н}}^2) / 4$  – площадь затрубного (кольцевого) пространства, м<sup>2</sup>;

$v_{\text{ВП}}$  – скорость восходящего потока, м/с;

$t$  – время контакта, с (в соответствии с РД 39-00147001-767-2000 принимается равным 480÷600 с при турбулентном течении и 600÷900 при ламинарном и течении);

Исследования показали, что при времени контакта менее 480 мин в 50% случае качество цементирования было неудовлетворительным и требовалось повторное цементирование.

За оптимальную для цементирования эксплуатационных колонн скорость восходящего потока принимают 1,8-2 м/с, для кондуктора и промежуточных колонн 1,5 м/с. Эти скорости обеспечивают наилучшее замещение вытесняемого раствора за счет равномерного подъёма буферной жидкости и тампонажного раствора вокруг колонны (отсутствие “языков”) и турбулентного режима течения.

Высота подъёма буферной жидкости должна быть не менее 150-200 метров по длине затрубного пространства. Такая же высота буферной жидкости должна быть при цементировании кондукторов и промежуточных колонн нефтяных скважин с нормальным и аномально низким пластовым давлением.

В случае применения маловязкой буферной жидкости (воды или близкой к ней по вязкости жидкости) ее объём  $V_{\text{БЖ}}$ , необходимый для разделения бурового и тампонажного растворов, когда нижняя цементировочная пробка не используется, рекомендуется определять из соотношения:

$$V_{\text{БЖ}} = 18 (h/L_c V_c)^{0,5} \quad (2)$$

где:  $h$  — средневзвешенный по длине условный диаметр канала (труба, кольцевой зазор), по которому движется поток буферной жидкости, м  $h = ((0,5d_{\text{T}} + 0,25(D_{\text{СКВ}} - d_{\text{н}})) I_{\text{к}}) / L$ ;

$L_c$  — суммарная длина колонны труб  $I_{\text{T}}$ , через которые прокачивают буферную жидкость, и интервала цементирования  $I_{\text{к}}$ , м;

$V_c$  — суммарный объём закачиваемых в скважину тампонажного  $V_{\text{ц}}$  и

продавочного  $V_{\text{п}}$  растворов, м<sup>3</sup>;

$d_{\text{т}}$  — средневзвешенный внутренний диаметр труб, м;

$d_{\text{н}}$  — наружный диаметр труб, м;

$D_{\text{с}}$  — фактический диаметр скважины в интервале цементирования, м.

При определении объёма буферной жидкости с плотностью меньше плотности бурового раствора при вскрытых нефтегазовых пластах следует также учитывать возможность газонефтепроявления за счёт снижения забойного давления во время продавки этой жидкости в заколонное пространство. В этом случае допускается снижение репрессии на пласт до 2,5 %. Исходя из этого допущения, получена формула, определяющая минимально допустимый объём буферной жидкости  $V_{\text{бж}}$  в м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{бж}} = \frac{0,25 \cdot \Delta P \cdot S_{\text{к}}}{\cos \alpha \cdot (\rho_{\text{бр}} - \rho_{\text{бж}}) \cdot g} \quad (3)$$

где:  $\rho_{\text{бр}}$  и  $\rho_{\text{бж}}$  — плотности бурового раствора и буферной жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta P$  — величина репрессии в соответствии с правилами безопасности в нефтегазовой промышленности, Па;

$S_{\text{к}}$  — площадь сечения затрубного пространства, м<sup>2</sup>;

$\alpha$  — средневзвешенный зенитный угол в интервале расположения буферной жидкости после её полного выхода из под башмака цементруемой колонны;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>

**Объём тампонажного раствора**  $V_{\text{ТР}}$  (в м<sup>3</sup>) определяется как сумма объёма кольцевого пространства в межтрубном пространстве (кондуктор — эксплуатационная колонна), объёма кольцевого пространства между стенками скважины и наружными стенками обсадной колонны, с учётом коэффициента кавернозности, и объёма цементного стакана, который оставляют в колонне:

$$V_{\text{ТР}} = \pi [(D_{\text{СКВк}}^2 - D_{\text{ОК}}^2) (L - H_{\text{К}}) + (d_{\text{КОН}}^2 - D_{\text{ОК}}^2) H_{\text{ЦК}} + d_{\text{НОК}}^2 h_{\text{СТ}}] / 4 \quad (4)$$

где:  $k$  — коэффициент кавернозности (обычно находится в пределах 1,05 – 1,4);

$D_{\text{СКВ}}$  — диаметр скважины, м;

$D_{\text{ОК}}$  — наружный диаметр обсадной колонны, м;

$d_{\text{КОН}}$  — внутренний диаметр кондуктора, м;

$d_{\text{НОК}}$  — внутренний диаметр низа обсадной колонны, м;

$L$  — глубина скважины по стволу, в м;

$H_{\text{К}}$  — глубина спуска кондуктора по стволу, м;

$H_{\text{ЦК}}$  — высота подъёма цементного раствора от башмака кондуктора по стволу, м;

$h_{\text{СТ}}$  — высота цементного стакана в обсадной колонне (расстояние между башмаком обсадной колонны и местом установки кольца “Стоп”, м.

Расчёт необходимого **количества продавочной жидкости**  $V_{\text{ПР}}$  (м<sup>3</sup>) выполняем по формуле:

$$V_{\text{ПР}} = k_{\text{ПР}} \pi [(d_{\text{ОК}}^2 L - d_{\text{НОК}}^2 h_{\text{СТ}}] / 4, \quad (5)$$

где:  $k_{\text{ПР}}$  - коэффициент, учитывающий сжатие продавочной жидкости (для глинистого раствора  $k_{\text{ПР}} = 1,03 - 1,05$ ).

$d_{\text{ОК}}$  – средневзвешенный внутренний диаметр обсадной колонны, м.

Следующим этапом расчёта является определение необходимых количеств компонентов (по массе или по объёму) буферной жидкости и тампонажного раствора.

При **расчете компонентов буферной жидкости** исходят из рецептуры этой жидкости. Рецептуру, которая даётся обычно в г/литр, кг/м<sup>3</sup> или весовых и объёмных процентах пересчитывают на требуемый объём жидкости (с учётом, если необходимо, плотности компонентов). Для некоторых буферных жидкостей, которые поставляются в заводской готовности, расчёт на компоненты не требуется.

**Расчет количества компонентов сухой тампонажной смеси и жидкости** для её затворения производят с учётом водотвёрдого (водоцементного) отношения рекомендуемого поставщиком и оптимальной плотности цементного раствора, которая для бездобавочного цемента равна 1,85 г/см<sup>3</sup>, а для облегчённого выбирается из условия недопущения гидроразрыва наиболее слабого пласта.

По значениям  $\rho_{\text{ТР}}$  (в г/см<sup>3</sup>) и выбранного (или подобранного в результате лабораторных испытаний) водотвёрдого отношения  $m$  предварительно определяют среднюю плотность твердой фазы  $\rho_{\text{T}}$  (в г/см<sup>3</sup>) тампонажного раствора:

$$\rho_{\text{T}} = \rho_{\text{ТР}} / [1 - m (\rho_{\text{ТР}} / \rho_{\text{Ж}} - 1)] \quad (6)$$

где  $\rho_{\text{Ж}}$  - плотность жидкости затворения, определяемая в процессе подбора рецептуры (если необходима модификация свойств тампонажного раствора, если нет, то  $\rho_{\text{Ж}} = 1$  г/см<sup>3</sup>) или по рекомендации поставщика тампонажной смеси, г/см<sup>3</sup>.

Масса тампонажного материала  $G$  (в тоннах), необходимая для приготовления 1 м<sup>3</sup> раствора,

$$G = \rho_{\text{T}} (\rho_{\text{ТР}} - \rho_{\text{Ж}}) / (\rho_{\text{T}} - \rho_{\text{Ж}}) \quad (7).$$

Необходимый объём тампонажного раствора для цементирования обсадной колонны определяется по формуле (2).

Общая масса сухого тампонажного материала (в тоннах) для приготовления требуемого объема тампонажного раствора

$$G_{\text{СУХ}} = K_{\text{Ц}} G V_{\text{ТР}}, \quad (8)$$

где  $K_{\text{Ц}} = 1,03 \div 1,05$  - коэффициент, учитывающий потери тампонажного материала при погрузочно-разгрузочных работах.

Расход сухого тампонажного материала на 1 м<sup>3</sup> воды затворения (в тоннах)

$$G_1 = \rho_{\text{Ж}} / m \quad (9)$$

Полный объём воды для затворения общей массы сухого тампонажного материала (в м<sup>3</sup>)

$$V_{\text{В}} = K_{\text{В}} G_{\text{СУХ}} / G_1, \quad (10)$$

где  $K_{\text{В}} = 1,08 \div 1,10$  - коэффициент, учитывающий потери воды.

Количество химических реагентов (в л - для жидких и в кг - для сухих веществ), необходимое для обработки 1 м<sup>3</sup> воды затворения, определяется по

формуле

$$Q_{XP} = 10 G_1 a, \quad (11)$$

где  $a$  - содержание химических реагентов по отношению к массе сухого тампонажного материала (определяется лабораторными испытаниями), %

Общее количество химических реагентов для обработки всего объема воды затворения

$$G_{XP} = Q_{XP} V_B \quad (12)$$

### Гидравлический расчет цементирования.

Гидравлический расчет цементирования обсадных колонн проводят для определения необходимой суммарной подачи цементировочных агрегатов  $Q$  из условия обеспечения максимально возможной скорости восходящего потока бурового и тампонажного растворов в затрубном пространстве  $v$ , допустимого давления на цементировочной головке  $P_{ЦГ}$  и забое скважины  $P_3$  (в интервале пласта с наименьшим градиентом гидроразрыва начала поглощения), а также для выбора цементировочного оборудования и определения продолжительности процесса цементирования  $t_{Ц}$ . При этом принимаются следующие граничные условия:

$$P_{ЦГ} \leq P_y / 1,5; \text{ для газовых скважин и } P_{ЦГ} \leq P_{РАСЧЁТ} \quad (13)$$

$$P_3 \leq 0,95 P_{ПГ} \text{ или } P_3 \leq 0,95 P_{ГР} \quad (14)$$

$$t_{Ц} = t_{ЗАК} + 15 \text{ мин} \leq 0,75 t_{ЗАГ}, \quad (15)$$

где  $P_y$  - допустимое давление на устье скважины (давление опрессовки), а  $P_{ЦГРАСЧЁТ}$  - максимальное давление на цементировочной головке при расчёте обсадной колонны на прочность, МПа;

$P_{ПГ}$  - давление начала поглощения, МПа;

$P_{ГР}$  - давление гидроразрыва пород на забое скважины или в интервале пласта с наименьшим градиентом гидроразрыва, МПа;

$t_{ЗАК}$  - затраты времени на закачивание и продавливание тампонажного раствора, мин;

$t_{ЗАГ}$  - время загустевания тампонажного раствора, определяемое консисометром, мин (для ПЦГ-I-100 равно 105 мин);

15 мин - дополнительное время, необходимое для вывода цементосмесительной машины на режим, освобождения продавочной пробки и получения сигнала "Стоп".

Гидравлический расчет цементирования скважин проводят в следующем порядке.

Максимальное ожидаемое давление на цементировочной головке  $P_{ЦГ}$  (в МПа) рассчитывают по формуле:

$$P_{ЦГ} = \Delta P_{ГС} + P_T + P_K + P_{СТ}, \quad (16)$$

где  $\Delta P_{ГС}$  - максимальная ожидаемая разность гидростатических давлений в затрубном пространстве и в трубах в конце процесса цементирования, МПа;

$P_T, P_K$  - гидравлические сопротивления соответственно в трубах и в затрубном пространстве при принятом значении  $v$ , МПа;

$P_{СТ} = 2,5 \div 3$  МПа - давление момента "Стоп".

Разность гидростатических давлений определяют по формуле:

$$\Delta P_{ГС} = 0,001 \text{ г} [(L^1 - H^1) (\rho_{БР} - \rho_{ПР}) + (H^1 - h^1) (\rho_{ТР} - \rho_{ПР})] \quad (17)$$

где:  $L^1$  - глубина скважины по вертикали, м;

$H^1$  — высота подъема тампонажного раствора от башмака колонны по вертикали, м;

$h^1$  — высота цементного стакана в колонне по вертикали, м;

$\rho_{ПР}$  - плотность продавочной жидкости г/см<sup>3</sup>.

Гидравлические сопротивления внутри обсадной колонны  $P_T$  и в затрубном пространстве  $P_K$  (в МПа) в конце продавки тампонажной смеси находят по формулам Дарси-Вейсбаха:

$$P_T = \sum P_T^i \quad P_T^i = 8,11 \lambda_T \rho_{ПР} Q^2 L^i / d_{ОК}^5 \quad (18)$$

$$P_K = 8,11 \lambda_K Q^2 \left\{ \rho_{ТР} (L - l) / [(D_{СКВ} - D_{ОК})^3 (D_{СКВ} + D_{ОК})^2] + \rho_{СРВЗВ} l / [(d_{КОН} - D_{ОК})^3 (d_{КОН} + D_{ОК})^2] \right\} \quad (19)$$

где  $\lambda_{T, K}$  - коэффициенты гидравлических сопротивлений внутри обсадной колонны и кольцевом пространстве, для практических расчетов принимаются равными 0,02 и 0,035 соответственно;

$D_{СКВ}$ ,  $D_{ОК}$ ,  $d_{КОН}$  - соответственно средний диаметр скважины, наружный диаметр обсадной колонны и внутренний диаметр кондуктора, см;

$Q$  - производительность закачки раствора, л/с;

$L$  - длина обсадной колонны, м;

$l$  - длина кондуктора, м;

$d_{ОК}^i$  - внутренние диаметры секций обсадной колонны, см;

$P_T^i$  - гидравлические сопротивления внутри секций обсадной колонны, имеющих диаметры  $d_{ОК}^i$ , МПа;

$L^i$  - длина секций обсадной колонны, м;

$\rho_{СРВЗВ}$  - средневзвешенная плотность раствора в кондукторе в конце продавки тампонажной смеси, г/см<sup>3</sup>. Равна  $\rho_{ТР}$  при цементировании колонны до устья;

$\rho_{ПР}$  - плотность продавочной жидкости, г/см<sup>3</sup>.

Производительность закачки цементного и бурового растворов (в л/с):

$$Q = 0,0785 (D_{СКВ}^2 K_{СРВЗВ} - D_{ОК}^2) v \quad (20)$$

где  $v$  - скорость подъема тампонажного раствора в кольцевом пространстве в м/с. Исходя из конкретных геолого-технических условий и практики цементирования скважин в данном районе выбирают максимально допустимую скорость восходящего потока бурового и тампонажного растворов в скважине  $v$  к моменту окончания продавки, когда имеются наиболее благоприятные условия гидроразрыва пород. (выше было указано, что за оптимальную для цементирования эксплуатационных колонн скорость восходящего потока принимают 1,8 - 2 м/с, для кондуктора и промежуточных колонн 1,5 м/с).

Максимальное ожидаемое давление на забое скважины  $P_3$  (в МПа) равно:

$$P_3 = P_{ГС} + P_K \quad (21)$$

где  $P_{ГС}$  - гидростатическое давление на забой со стороны составного столба тампонажного раствора, буферной жидкости и бурового растворов (в МПа):

$$P_{ГС} = 0,001 \text{ г} [(L^1 - H^1) \rho_{СРВЗВ} + H^1 \rho_{ТР}] \quad (22)$$

По вычисленным  $P_{ЦГ}$  и  $P_3$  проверяют условия (13), (14). Если одно из этих условий не выполняется, то корректируют  $v$  или выбирают другой тампонажный раствор (корректируют состав) и повторно рассчитывают эти параметры до выполнения ограничений.

Затем рассчитывают давление на цементировочных насосах цементировочных агрегатов  $P_{ЦА}$  (в МПа):

$$P_{ЦА} \geq P_{ЦГ} / 0,8 \quad (23)$$

По расчетным значениям  $Q$  и  $P_{ЦА}$  выбирают тип цементировочных агрегатов (ЦА), количество которых определяется из соотношения

$$n = Q / q + 1 \quad (24)$$

где:  $q$  — производительность одного ЦА при давлении  $P_{ЦА}$ ;

1 – резервный агрегат.

Затем проверяется, достаточно ли суммарного объёма мерных баков цементировочных агрегатов  $V_{МБ}$  (в  $\text{м}^3$ ) для воды затворения тампонажной смеси:

$$V_{МБ} = 6 n \geq V_B \quad (25)$$

где  $V_B$  взято из формулы (8).

Если условие (25) не выполняется, и нет возможности доливать мерные баки в процессе цементирования, то количество цементировочных агрегатов увеличивается.

Требуемое количество цементосмесительных машин  $m$  определяется по формуле:

$$m = Q / q_{СМ} \quad (26)$$

где  $q_{СМ}$  - производительность одной цементосмесительной машины, л/с.

Затем проверяется, достаточно ли суммарной массы тампонажной смеси в бункерах цементосмесительных машин  $G$  (в тоннах) для цементирования колонны:

$$G = m G_B \geq G_{СУХ} \quad (27)$$

где  $G_{СУХ}$  - требуемая суммарная масса сухого тампонажного материала из формулы (8), т;

$G_B$  - вместимость бункера смесителя, т.

Если условие не выполняется и нет возможности дозагрузки бункеров цементосмесительных машин при цементировании обсадной колонны, их количество увеличивается.

В случае использования осреднительной ёмкости, в дополнение к проведённому выше расчёту, определяют необходимое количество цементировочных агрегатов для перекачки тампонажного раствора от цементосмесительных машин в ёмкость. Расчёт ведется с учётом того, что цементировочные насосы ЦА можно использовать в режиме максимальной подачи с минимальным развиваемым давлением. При этом водоподающие насосы этих цементировочных агрегатов и их мерные ёмкости можно применить для затворения тампонажной смеси.

Расчёт режима закачки и продавки тампонажной смеси.

Расчёт режимов закачки растворов начинают с построения графика изменения давлений на цементировочной головке в зависимости от суммарного объёма закаченных растворов. График строится по трём характерным точкам, между которыми изменение давления на цементировочной головке с некоторой долей условности считают линейным. Это точка начала закачки тампонажного раствора в обсадную колонну, в которой давление на цементировочной головке равно сумме гидравлических сопротивлений в колонне и кольцевом пространстве, точка, соответствующая моменту прихода тампонажного раствора на забой, когда давление на цементировочной головке минимально и точка в конце продавки тампонажного раствора, в которой давление на цементировочной головке максимально.

Максимальное давление на цементировочной головке, без учёта давления “Стоп” в конце продавки тампонажной смеси  $P_{Ц}$  может быть найдено по формуле:

$$P_{Ц} = P_{ЦГ} - P_{СТ} \quad (28).$$

Рассчитаем теперь давление, которое возникает на цементировочной головке в момент прихода тампонажной смеси на забой,  $P_{Ц}^1$  (в МПа):

$$P_{Ц}^1 = \Delta P_{ГС}^1 + P_{Т}^1 + P_{К}^1 \quad (29)$$

где  $\Delta P_{ГС}^1$  - максимальная ожидаемая разность гидростатических давлений в затрубном пространстве и в трубах на момент прихода тампонажной смеси на забой, МПа (эта величина отрицательна);

$P_{Т}^1, P_{К}^1$  - гидравлические сопротивления соответственно в трубах и в затрубном пространстве, МПа;

$\Delta P_{ГС}^1$  можно рассчитать по формуле:

$$\Delta P_{ГС}^1 = 0,001 g L^1 (\rho_{БР} - \rho_{СРВЗВ}^1) \quad (30)$$

где:  $L^1$  - глубина скважины по вертикали, м;

$\rho_{БР}$  - плотность бурового раствора, г/см<sup>3</sup> (плотность буферного раствора принимается равной плотности бурового раствора);

$\rho_{СРВЗВ}^1$  - средневзвешенная плотность раствора в обсадной колонне на момент прихода тампонажного раствора на забой, г/см<sup>3</sup>. Она равна плотности тампонажного раствора  $\rho_{ТР}$ , если необходимый объём тампонажного раствора  $V_{ТР} \geq V_{ОК}$  - внутреннего объёма обсадной колонны, равного (в м<sup>3</sup>):

$$V_{ОК} = \pi d_{ОК}^2 L / 4, \quad (31)$$

где:  $L$  - длина обсадной колонны, м;

$d_{ОК}$  - средневзвешенный внутренний диаметр обсадной колонны, м.

В связи с тем, что величина  $P_{Ц}^1$  будет иметь малое и даже отрицательное значение, закачку тампонажного раствора до забоя можно производить с максимальной производительностью, которая ограничивается только условием (14)  $P_{З}^1 \leq 0,95 P_{ГР}$ .

Так как забойное давление с другой стороны равно  $P_{З}^1 = P_{ГС}^1 + P_{К}^1$ , условие (14) можно переписать в виде:

$$P_{ГС}^1 + P_{К}^1 \leq 0,95 P_{ГР} \quad (32).$$

Записав выражение для гидростатического давления на забой  $P_{ГС}^1$  и преобразовав (32) относительно гидравлического сопротивления в кольцевом пространстве  $P_{К}$  получим:

$$P_K^1 \leq 0,95 P_{ГР} - 0,001 g L^1 \rho_{БР} \quad (33)$$

где:  $L^1$  - глубина скважины по вертикали, м;  
 $\rho_{БР}$  - плотность бурового раствора, г/см<sup>3</sup>.

Из формул (19), (33) найдём максимально допустимый расход тампонажного раствора при его закачке до забоя,  $Q_{МАКС}$  (л/с):

$$Q_{МАКС} \leq \sqrt{[0,95 P_{ГР} - 0,001 g L^1 \rho_{БР}] / 8,11 \lambda_K \{ \rho_{ТР} (L - 1) / [(D_{СКВ} - D_{ОК})^3 (D_{СКВ} + D_{ОК})^2] + \rho_{СРВЗВ} l / [(d_{КОН} - D_{ОК})^3 (d_{КОН} + D_{ОК})^2] \}} \quad (34)$$

и гидравлические сопротивления в трубах  $P_T^1$  (в МПа) для этого случая из формулы (18):

$$P_T^1 = \Sigma P_T^i \quad P_T^{1i} = 8,11 \lambda_T \rho^i Q_{МАКС}^2 L^i / d_{ОК}^{5i} \quad (35)$$

где  $\lambda_{Т, К}$  - коэффициенты гидравлических сопротивлений внутри обсадной колонны и кольцевом пространстве, для практических расчетов принимаются равными 0,02 и 0,035 соответственно;

$D_{СКВ}$ ,  $D_{ОК}$ ,  $d_{ОК}$  - соответственно средний диаметр скважины, наружный диаметр обсадной колонны и внутренние диаметры участков обсадных труб, см;

$L$  - длина обсадной колонны, м.

$\rho^i$  - плотность раствора в секциях обсадной колонны, г/см<sup>3</sup>. Она равна плотности тампонажного раствора  $\rho_{ТР}$ , если необходимый объём тампонажного раствора  $V_{ТР} \geq V_{ОК}$ ;

$L^i$  - длина секций обсадной колонны, м;

$d_{ОК}^i$  - внутренние диаметры секций обсадной колонны, см.

Подставив полученные значения  $\Delta P_{ГС}^1$ ,  $P_T^1$ ,  $P_K^1$  в (31) найдём величину давления на цементировочной головке в момент прихода тампонажного раствора на забой.

Давление на цементировочной головке в момент начала закачки тампонажного раствора в обсадную колонну  $P_{Ц}^0$  (в МПа) равна сумме гидравлических сопротивлений в секциях обсадной колонны  $P_T^0$  и  $P_K^0$ , которые рассчитывают по формулам, аналогичным формулам (18) и (19):

$$P_T^0 = \Sigma P_T^i \quad P_T^{0i} = 8,11 \lambda_T \rho_{БР} Q_{МАКС}^2 L^i / d_{ОК}^{5i} \quad (36)$$

$$P_K^0 = 8,11 \lambda_K Q_{МАКС}^2 \{ \rho_{БР} (L - 1) / [(D_{СКВ} - D_{ОК})^3 (D_{СКВ} + D_{ОК})^2] + \rho_{БР} l / [(d_{КОН} - D_{ОК})^3 (d_{КОН} + D_{ОК})^2] \} \quad (37)$$

где  $\lambda_{Т, К}$  - коэффициенты гидравлических сопротивлений внутри обсадной колонны и кольцевом пространстве, для практических расчетов принимаются равными 0,02 и 0,035 соответственно;

$D_{СКВ}$ ,  $D_{ОК}$ ,  $d_{КОН}$  - соответственно средний диаметр скважины, наружный диаметр обсадной колонны и внутренний диаметр кондуктора, см;

$Q$  - производительность закачки раствора, л/с;

$L$  - длина обсадной колонны, м;

$l$  - длина кондуктора, м;

$d_{ОК}^i$  - внутренние диаметры секций обсадной колонны, см;

$P_T^i$  - гидравлические сопротивления внутри секций обсадной колонны, имеющих диаметры  $d_{ОК}^i$ , МПа;

$L^i$  - длина секций обсадной колонны, м;

$\rho_{БР}$  - плотность продавочной жидкости, г/см<sup>3</sup>.

Давление на цементировочной головке в начале закачки тампонажного раствора в обсадную колонну не должно быть больше давления в конце продавки. Если по результатам расчёта это условие не выполняется, производят уменьшение  $Q_{\text{МАКС}}$  и пересчитывают давления на цементировочной головке в моменты начала закачки тампонажного раствора в обсадную колонну и его прихода на забой.

Таким образом, мы найдём необходимые для построения графика изменения давления на цементировочной головке величины давлений в моменты начала закачки тампонажного раствора  $P_{\text{Ц}}^0$ , прихода тампонажного раствора на забой  $P_{\text{Ц}}^1$  и конца продавки  $P_{\text{Ц}}$  (ординаты графика).

Следующий этап – определение суммарных закачанных объёмов  $\Sigma V$  в скважину при цементировании (абсциссы графика). Эти объёмы рассчитывают без учёта закачки буферной жидкости. На момент начала закачки тампонажного раствора объём  $\Sigma V^0$  равен нулю. В момент прихода тампонажного раствора на забой  $\Sigma V^1$  равна внутреннему объёму обсадной колонны  $V_{\text{ОК}}$ .

$$\Sigma V^1 = V_{\text{ОК}} \quad (39)$$

В конце продавки тампонажного раствора  $\Sigma V$  равен сумме объёмов тампонажного раствора  $V_{\text{ТР}}$  и продавочной жидкости  $V_{\text{ПР}}$ :

$$\Sigma V = V_{\text{ТР}} + V_{\text{ПР}} \quad (39)$$

По полученным данным строят график изменения давления на цементировочной головке.

На график накладывают горизонтальные линии соответствующие максимальным давлениям развиваемым цементировочным насосом цементировочных агрегатов на каждой передаче, от максимально допустимой до низшей передачи, предварительно умноженным на 0,8. То есть строятся графики  $P_i(V) \bullet 0,8$ , совмещённые с графиком изменения давления на цементировочной головке. Пересечения этих графиков дают возможность определить объёмы технологических жидкостей, откаченные цементировочными насосами на разных передачах  $V_i$  с расходами  $Q_i = q_i(n-1)$ . Здесь  $n$  – число цементировочных агрегатов,  $q_i$  подача цементировочного насоса на  $i$ -ой передаче.

Затем вычисляется общее время закачки и продавки тампонажного раствора  $t_{\text{цеМ}}$  в минутах, по формуле:

$$t_{\text{цеМ}} = 16,7 \Sigma V_i / (q_i (n-1)) + 16,7 V_{\text{П}} / q_{\text{П}} \quad (40)$$

где:  $q_i$ - производительность одного цементировочного агрегата на  $i$ -ой передаче, л/с;

$n$  – число цементировочных агрегатов;

$V_i$  – объёмы, откаченные всеми задействованными цементировочными агрегатами на  $i$ -ой передаче, м<sup>3</sup>.

$q_{\text{П}}$  – производительность одного цементировочного агрегата на второй передаче до момента посадки цементировочной пробки на стоп, равная  $q_{\text{П}} = 3 \div 4$  л/с;

$V_{\text{П}}$  – объём, откачиваемый одним цементировочным агрегатом до посадки цементировочной пробки на стоп-кольцо, равный  $V_{\text{П}} = 1,0 \div 1,5$  м<sup>3</sup>

Затем определяем время цементирование скважины  $t_{ц}$  (в мин):

$$t_{ц} = t_{цем} + 15 \text{ мин} \quad (41)$$

где  $t_{цем}$  - затраты времени на закачивание тампонажного раствора и его продавку, мин;

15 мин – дополнительное время, необходимое для вывода цементосмесительной машины на режим, освобождения продавочной пробки и получения сигнала “Стоп”.

По вычисленному значению  $t_{ц}$  проверяют условие (15). Если это условие не выполняется, то выбирают другой тампонажный раствор (корректируют состав) и повторно рассчитывают этот параметр до выполнения ограничения.

Рассчитываем также число агрегатов, задействованных в закачке буферной жидкости, по формуле:

$$n_{БЖ} = V_{БЖ} / V_{МБ} \quad (42)$$

где:  $V_{БЖ}$  – объём буферной жидкости, м<sup>3</sup>;

$V_{МБ}$  – объём мерных баков, м<sup>3</sup>.

Время закачки буферной жидкости  $t_{БЖ}$  определяем по формуле:

$$t_{БЖ} = 16,7 V_{БЖ} / (q_{МАКС} n_{БЖ}), \quad (43)$$

где:  $V_{БЖ}$  – объём буферной жидкости, м<sup>3</sup>;

$q_{МАКС}$  - производительность закачки раствора в обсадную колонну одним цементировочным агрегатом в режиме ускоренной закачки л/с.

По результатам расчёта количества и выбора цементировочной техники *разрабатывают технологическую схему обвязки цементировочного оборудования.* Схема обвязки выбирается в зависимости от того, предполагалось ли использование осреднительной ёмкости при цементировании обсадной колонны или нет. На рисунках 1 и 2 приведены два варианта схемы обвязки – без применения осреднительной ёмкости и с осреднительной ёмкостью, соответственно.

При цементировании коротких обсадных колонн применение блока манифольда может не потребоваться.



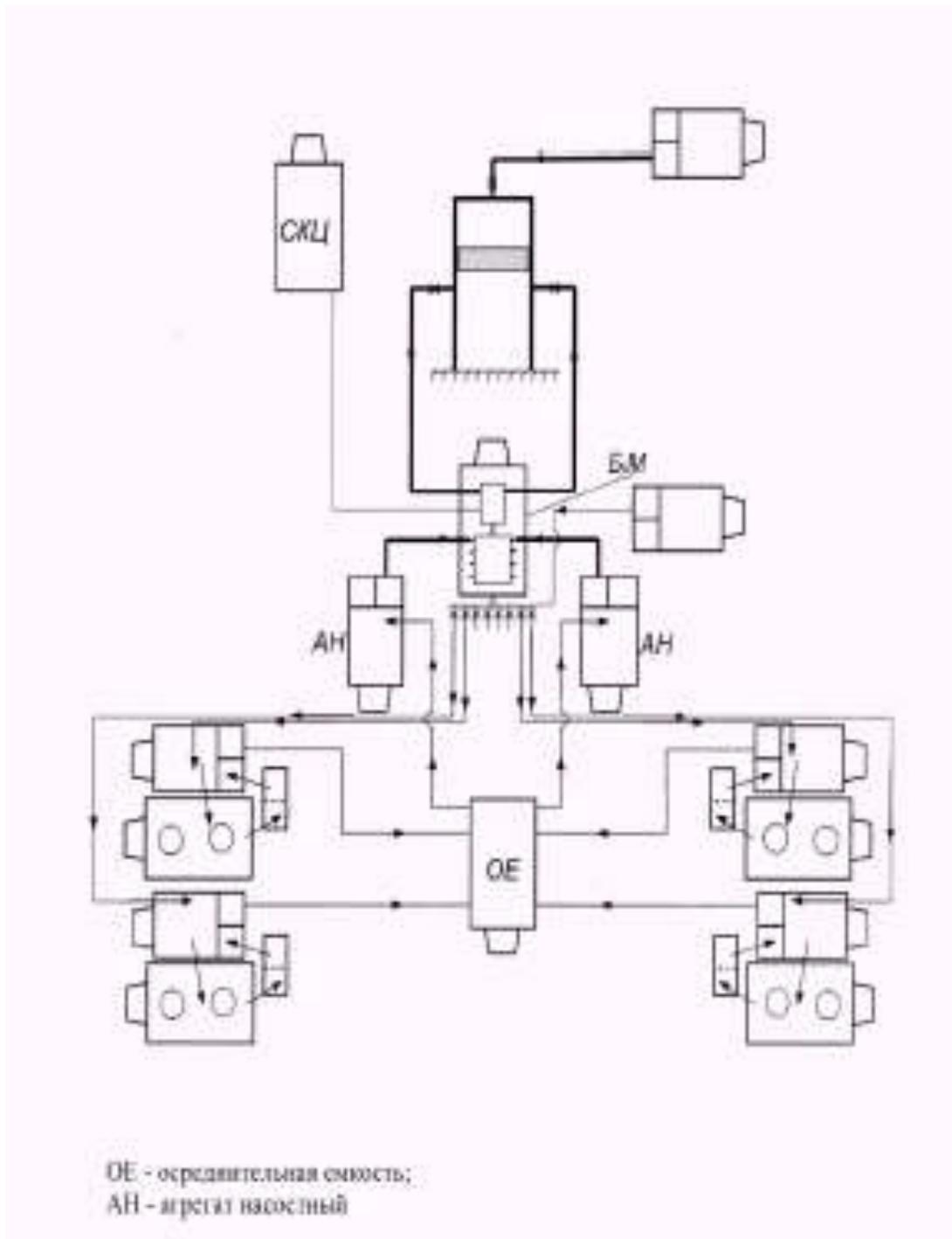


Рис. 2. Схема обвязки цементировочной техники с помощью осреднительной ёмкости