

Семинарские занятия по дисциплине  
«Техника и технология строительства нефтяных и газовых скважин».

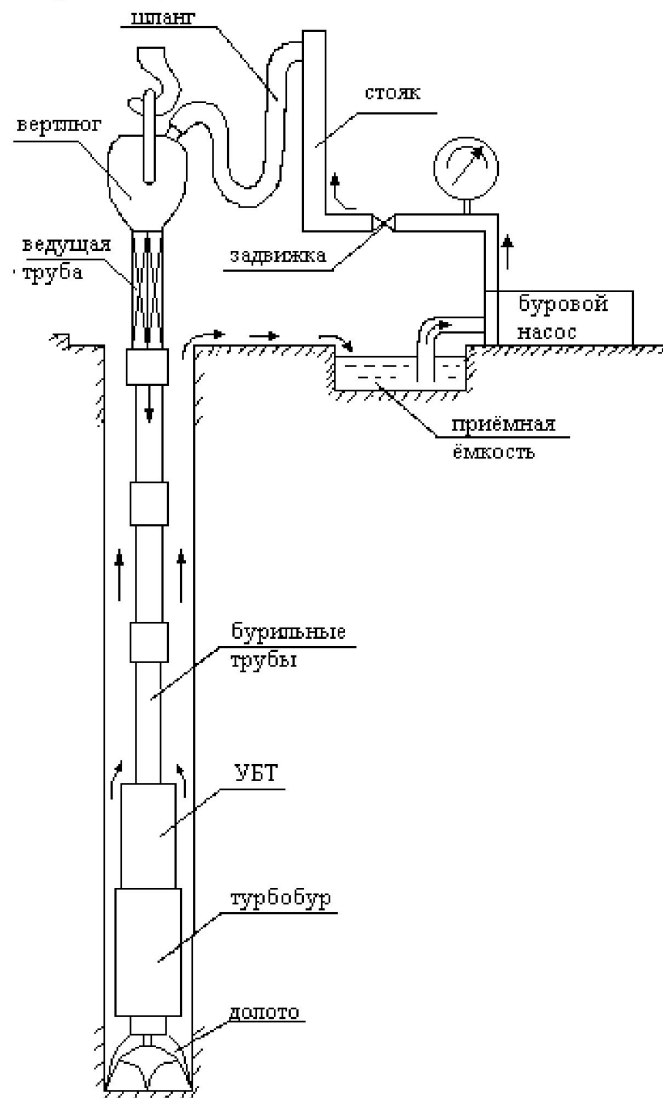
**Семинары №8 и 9**

Гидравлические расчеты в бурении. График эквивалентов градиентов давлений.

Основные Темы семинара:

1. Гидравлические расчеты в бурении.
2. График эквивалентов градиентов давления.

# Циркуляционная система скважины



# Вязкопластичные и псевдопластичные жидкости

Понятие о пластичных жидкостях впервые ввел Бингам, поэтому их называют бингамовскими вязкопластичными жидкостями или бингамовскими телами.

Они отличаются от ньютоновских жидкостей (псевдопластичных) тем, что для инициирования течения требуется приложить некоторое конечное напряжение.

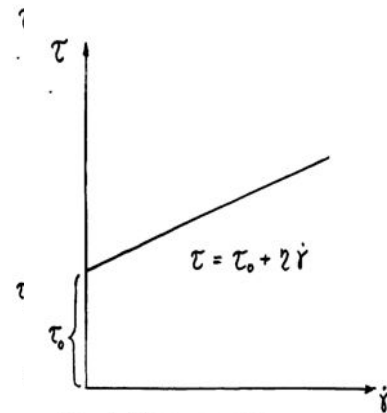


Рис.4 Кривая течения вязкопластичного тела Бингама

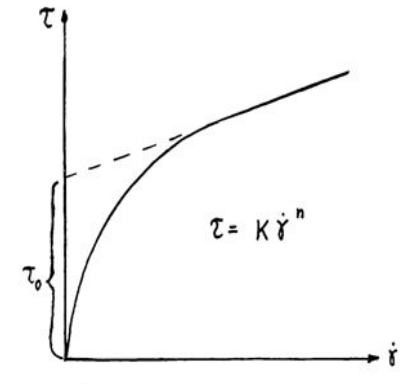


Рис.5 Кривая течения псевдопластичной жидкости

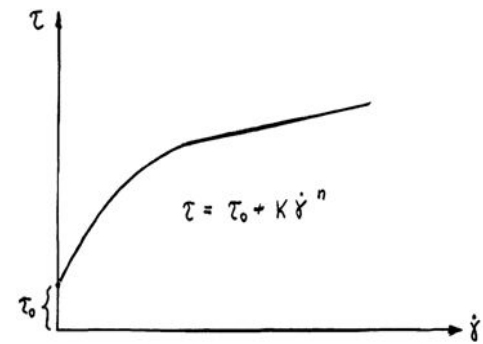
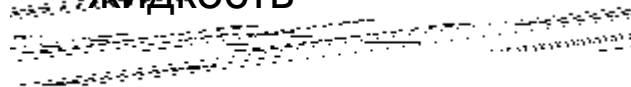
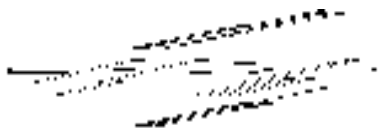


Рис.6 Кривая течения жидкости в соответствии с моделью Гершеля - Балкли

Вязкопластичная  
жидкость

Псевдопластичная  
жидкость



# Исходные данные для гидравлических расчетов

	Паименование	Обозна- чение	Размер- ность	Величи- на
1	Глубина начала бурения	$L_n$	м	
2	Глубина конца бурения	$L_k$	м	
3	Способ бурения			
4	Описание линейных размеров скважины для максимальной глубины $L_k$ : глубина конца 1-го участка глубина конца 2-го участка глубина конца 3-го участка глубина конца 4-го участка	$l_1$ $l_2$ $l_3$ $l_4$	м м м м	
	диаметр скважины на 1-м участке диаметр скважины на 2-м участке диаметр скважины на 3-м участке диаметр скважины на 4-м участке	$D_1$ $D_2$ $D_3$ $D_4$	м м м м	
5	Описание линейных размеров колонны труб при глубине $L_k$ (снизу вверх) по секциям: длина 1-й секции (Приложение 4) длина 2-й секции длина 3-й секции длина 4-й секции	$h_1$ $h_1$ $h_2$ $h_3$ $h_4$	м м м м	
	код трубы 1-й секции (Приложение 9) код трубы 2-й секции код трубы 3-й секции код трубы 4-й секции			
6	Код забойного двигателя (Приложение 10)			
7	Типоразмер долота			
8	Код насосного агрегата (Приложение 4)			
9	Количество установленных насосов			
10	Код обвязки насосов (манифольда)			
11	Параметры бурового раствора: - плотность - динамическое напряжение сдвига - структурная (динамическая) вязкость	$\rho$ $\tau_o$ $\eta$	кг/м <sup>3</sup> Па Па*с	

	Паименование	Обозначение	Размерность	Величина
12	<p>Технологические и технические ограничения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- число одновременно работающих насосов</li> <li>- предельно допустимое давление на насосах</li> <li>- рекомендуемая подача насосов</li> <li>- максимально допустимая подача насосов</li> <li>- минимально допустимая подача насосов</li> <li>- предельно допустимые потери давления в заколонном пространстве</li> <li>- минимальный диаметр гидромониторной насадки, допущенной к применению</li> </ul>	<p><math>P_{доп}</math></p> <p><math>Q_{рц}</math> <math>Q_{max}</math></p> <p><math>Q_{min}</math></p> <p><math>p_{к.доп}</math></p> <p><math>d_{нм}</math></p>	<p>МПа</p> <p>МПа</p> <p>дм<sup>3</sup>/с дм<sup>3</sup>/с</p> <p>дм<sup>3</sup>/с</p> <p>МПа</p> <p>МПа</p>	
13	<p>Сведения о слабом пласте:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- глубина расположения кровли</li> <li>- давление гидроразрыва</li> <li>- пластовое давление</li> </ul>	<p><math>L_{сл}</math></p> <p><math>p_{гр}</math></p> <p><math>p_{пл}</math></p>	<p>м</p> <p>МПа</p> <p>МПа</p>	
14	<p>Сведения о проявляющем (напорном) пласте:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- глубина кровли пласта</li> <li>- пластовое давление</li> <li>- мощность пласта</li> <li>- тип флюида (нефть, газ, вода)</li> <li>- плотность жидкости</li> <li>- относительная плотность газа (по воздуху)</li> </ul>	<p><math>L_{пл}</math></p> <p><math>p_{пл}</math></p> <p><math>S_{пл}</math></p> <p><math>\rho_{пл}</math></p> <p><math>\rho^*</math></p>	<p>м</p> <p>МПа</p> <p>м</p> <p>кг/м<sup>3</sup></p>	

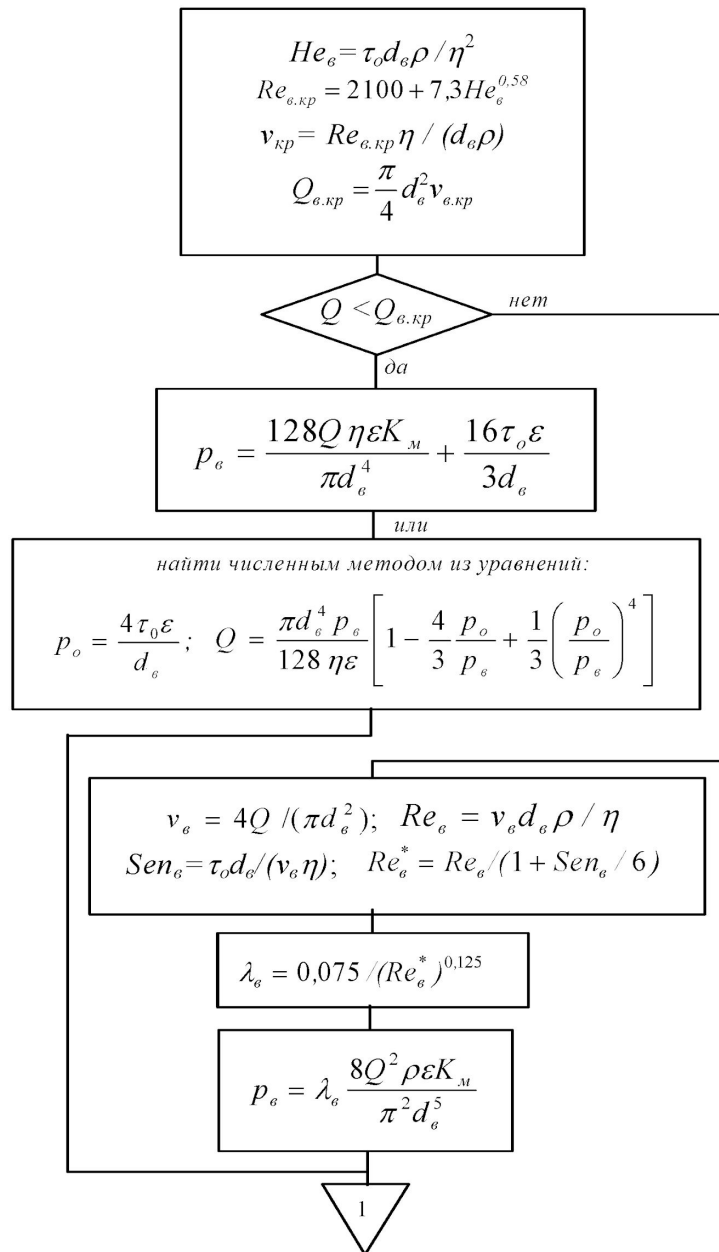
## Условные обозначения переменных и констант:

Средняя скорость потока в трубах	$v_s$
Внутренний диаметр канала в трубах	$d_s$
Порядковый номер элемента	$i$
Длина $i$ -того элемента	$\varepsilon_i$
Минимальный диаметр канала в соединении	$d_c$
Плотность жидкости	$\rho$
Параметр (критерий) Рейнольдса для потока в трубе	$Re_s$
Критерий Хёдстрема для потока в трубе	$He_s$
Критерий Сен-Венана-Ильюшина (для трубы)	$Sen_s$
Индекс (показатель) консистенции псевдопластичной (степенной) жидкости	$K$
Показатель нелинейности (степенная жидкость)	$n$
Диаметр скважины	$D$
Коэффициент гидравлического сопротивления	$\lambda$
Критическая скорость движения жидкости в трубах	$v_{с.кр}$
Критический расход в трубах	$Q_{с.кр}$
Критическая скорость жидкости в заколонном пространстве	$v_{к.кр}$
Критический расход в заколонном пространстве за трубами	$Q_{к.кр}$
Площадь сечения заколонного пространства	$F_{кр}$
Критическая скорость жидкости в заколонном пространстве за соединениями (муфтами, замками)	$v_{км.кр}$
Критический расход жидкости в заколонном пространстве за соединениями (муфтами, замками)	$Q_{м.кр}$
Расход жидкости в циркуляционной системе (подача насосов)	$Q$
Коэффициент относительных потерь давления в соединениях	$K_m$
Длина одной трубы	$l_o$
Наружный диаметр трубы	$d_n$
Наружный диаметр соединения (муфты, замка)	$d_m$
Критерий Рейнольдса для вязкой жидкости	$Re$
Критерий Рейнольдса (приведенный) для трубы при течении вязкопластичной жидкости	$Re_s^*$
Критерий Сен-Венана	$Sen$

Критерий Хёдстрема	$He$
Потери давления в трубе	$P_{\sigma}$
Потери давления в заколонном пространстве	$P_{\kappa}$
Потери давления в заколонном пространстве за трубами	$P_{\kappa,т}$
Потери давления <b>местные</b> в заколонном пространстве за замками (муфтами)	$P_{\kappa,мм}$
Потери давления <b>лнейные</b> в заколонном пространстве за замками (муфтами)	$P_{\kappa,л}$
Потери давления в заколонном пространстве за забойным двигателем	$P_{\kappa,тб}$
Общие потери давления в циркуляционной системе (без потерь в обвязке насосов)	$P_n$
Потери давления в обвязке насосов (в манифольде)	$P_{обв}$
Допустимые потери в заколонном пространстве	$P_{\kappa,доп}$
Перепад давления в забойном двигателе	$P_{тб}$
Средняя скорость движения жидкости в заколонном пространстве	$v_{\kappa}$
Перепад давления на долоте	$P_{\delta}$
Коэффициент потерь давления в обвязке насосов, Па*с <sup>2</sup> /(м <sup>3</sup> /кг)	$A_{обв}$
Критическая скорость жидкости в заколонном пространстве за забойным двигателем	$v_{\kappa,тб,кр}$
Критический расход жидкости в заколонном пространстве за забойным двигателем	$Q_{\kappa,тб,кр}$
Длина забойного двигателя	$l_{тб}$
Наружный диаметр забойного двигателя	$d_{тб}$
Коэффициент, характеризующий зависимость перепада давления на турбобуре от расхода	$A_{тб}$
Коэффициент расхода промывочных каналов долот	$\mu_n$
Площадь забоя скважины	$F_{\delta}$
Скорость движения колонны труб в скважине	$u_n$
Эквивалентная скорость	$u_{эке}$
Расход жидкости, соответствующий эквивалентной скорости	$Q_{эке}$
Рациональный (рекомендуемый) расход жидкости	$Q_{рц}$
Коэффициент наполнения насосов	$\beta$
Допустимое давление для цилиндрических втулок насоса данного диаметра	$P_{от}$
Диаметр отверстия гидромониторных насадок долот	$d_o$
Число используемых насадок в долоте	$z$
Диаметр отверстия подводящего канала долота	$d_n$
Суммарная площадь промывочных отверстий долота	$f_{\delta}$
Удельный расход жидкости, приходящийся на единицу площади забоя, (м <sup>3</sup> /с) м <sup>2</sup>	$q$
Обобщенный коэффициент потерь давления в трубах при ламинарном движении степенной жидкости, Па/(м <sup>3</sup> /с)	$S_a$

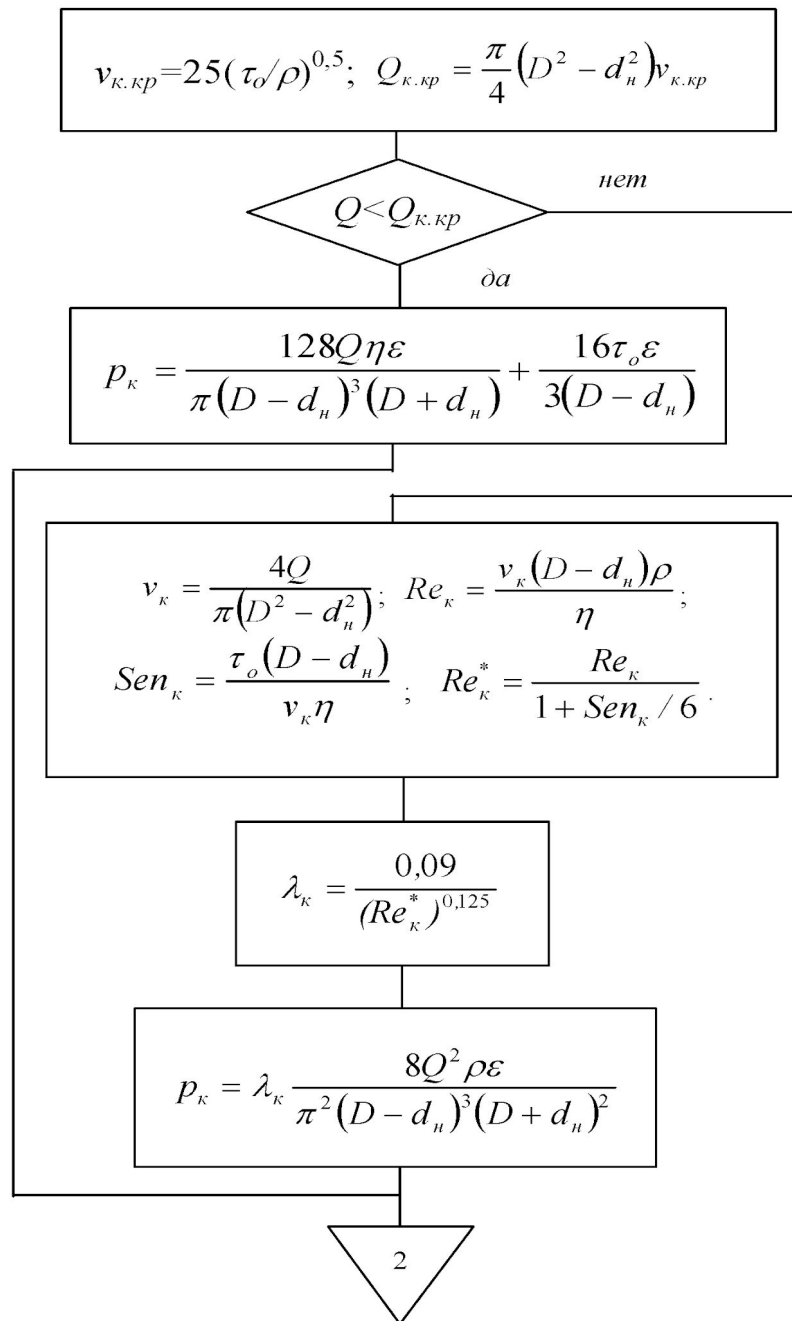
Алгоритм расчета потерь и перепадов давления  
в циркуляционной системе скважины

Лист 1. Потери давления в трубах при движении вязкопластичной жидкости





**Лист 2.** Потери давления в заколонном пространстве при движении  
вязкопластичной жидкости (ВПЖ)



**Лист 3.** Потери давления в заколонном пространстве за замками (муфтами) при движении вязкопластичной жидкости (ВПЖ)

$$v_{км.кр} = 25(\tau_o/\rho)^{0,5}; \quad Q_{км.кр} = \frac{\pi}{4}(D^2 - d_m^2)v_{км.кр}$$

$$P_{к.мм} = \frac{8Q^2 \rho}{\pi^2(D^2 - d_m^2)^2} \left[ 1,25 + \frac{D^2 - d_m^2}{D^2 - d_h^2} \left( 0,75 \frac{D^2 - d_m^2}{D^2 - d_h^2} - 2 \right) \right]$$

$$Q < Q_{км.кр}$$

нет

да

$$P_{км} = \left[ \frac{128Q\eta l_m}{\pi(D-d_m)^3(D+d_m)} + \frac{16\tau_o l_m}{3(D-d_m)} + P_{к.мм} \right] \frac{\varepsilon}{l_o}$$

$$P_{км} = \left[ \frac{0,192Q^2 l_m \rho}{\pi^2(D-d_m)^3(D+d_m)^2} + P_{к.мм} \right] \frac{\varepsilon}{l_o}$$

3

**Лист 4.** Потери давления в трубах при движении псевдопластичной (степенной) жидкости (ППЖ)

$$f'(n) = \frac{(1+3n)^2}{n} \left( \frac{1}{2+n} \right)^{\frac{n+2}{n+1}}; \quad Re_{в.кр} = \frac{6464}{f'(n)}$$

$$Q_{в.кр} = \pi \left[ \frac{Re_{в.кр} d^{4-3n} K \left( \frac{3n+1}{n} \right)^n}{2^{7-3n} \rho} \right]^{\frac{1}{2-n}}$$

$Q < Q_{в.кр}$

нет

да

$$p_e = \frac{4K\varepsilon}{d_e} \left[ 8 \left( \frac{3n+1}{n} \right) \frac{Q}{\pi d_e^3} \right]^n K_M$$

$$v_e = \frac{4Q}{\pi d_e^2}; \quad Re_e = 8^{1-n} \left( \frac{4n}{3n+1} \right)^n \frac{v_e^{2-n} d_e^n \rho}{K}$$

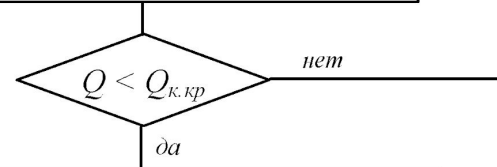
$$\lambda_e = \frac{0,3164}{Re_e^{0,25}}; \quad p_e = \lambda_e \frac{\varepsilon v_e^2 \rho}{2d_e} K_M$$

Лист 5. Потери давления в заколном пространстве при движении псевдопластичной (степенной) жидкости

$$f'(n) = \frac{(2n+1)^2}{n} \left( \frac{1}{2+n} \right)^{\frac{n+2}{n+1}};$$

$$Re_{к.кр} = 4848 / f'(n)$$

$$Q_{к.кр} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_n^2) \left[ \frac{Re_{к.кр} K \left( \frac{2n+1}{n} \right)^n}{12^{1-n} (D - d_n)^n \rho} \right]^{\frac{1}{2-n}}$$



$$p_k = 2^{2+4n} K \left[ \frac{2n+1}{n} \frac{Q}{\pi(D+d_n)} \right]^n \frac{\varepsilon}{(D-d_n)^{2n+1}}$$

$$v_k = \frac{4Q}{\pi(D^2 - d_n^2)};$$

$$Re_k = 12^{1-n} \left( \frac{3n}{2n+1} \right)^n \frac{v_k^{2-n} (D - d_n)^n \rho}{K}$$

$$\lambda_k = \frac{0,09}{Re^{0,125}}; \quad p_k = \lambda_k \frac{\varepsilon v_k^2 \rho}{2(D - d_n)}$$

**Лист 6.** Потери давления в заколонном пространстве за замками (муфтами) при движении псевдопластичной (степенной) жидкости

$$f'(n) = \frac{(2n+1)^2}{n} \left( \frac{1}{n+2} \right)^{\frac{n+2}{n+1}}$$

$$Re_{км.кр} = 4848 / f'(n)$$

$$Q_{км.кр} = \frac{\pi(D^2 - d_M^2)}{4} \left[ \frac{Re_{км.кр} K \left( \frac{2n+1}{n} \right)^n}{12^{1-n} (D - d_M)^n \rho} \right]^{\frac{1}{2-n}}$$

$$P_{кмм} = \frac{8Q^2 \rho}{\pi^2 (D^2 - d_M^2)^2} \left[ 1,25 + \frac{D_2 - d_M^2}{D_2 - d_n^2} \left( 0,75 \frac{D_2 - d_M^2}{D_2 - d_n^2} - 2 \right) \right]$$

$$Q < Q_{км.кр}$$

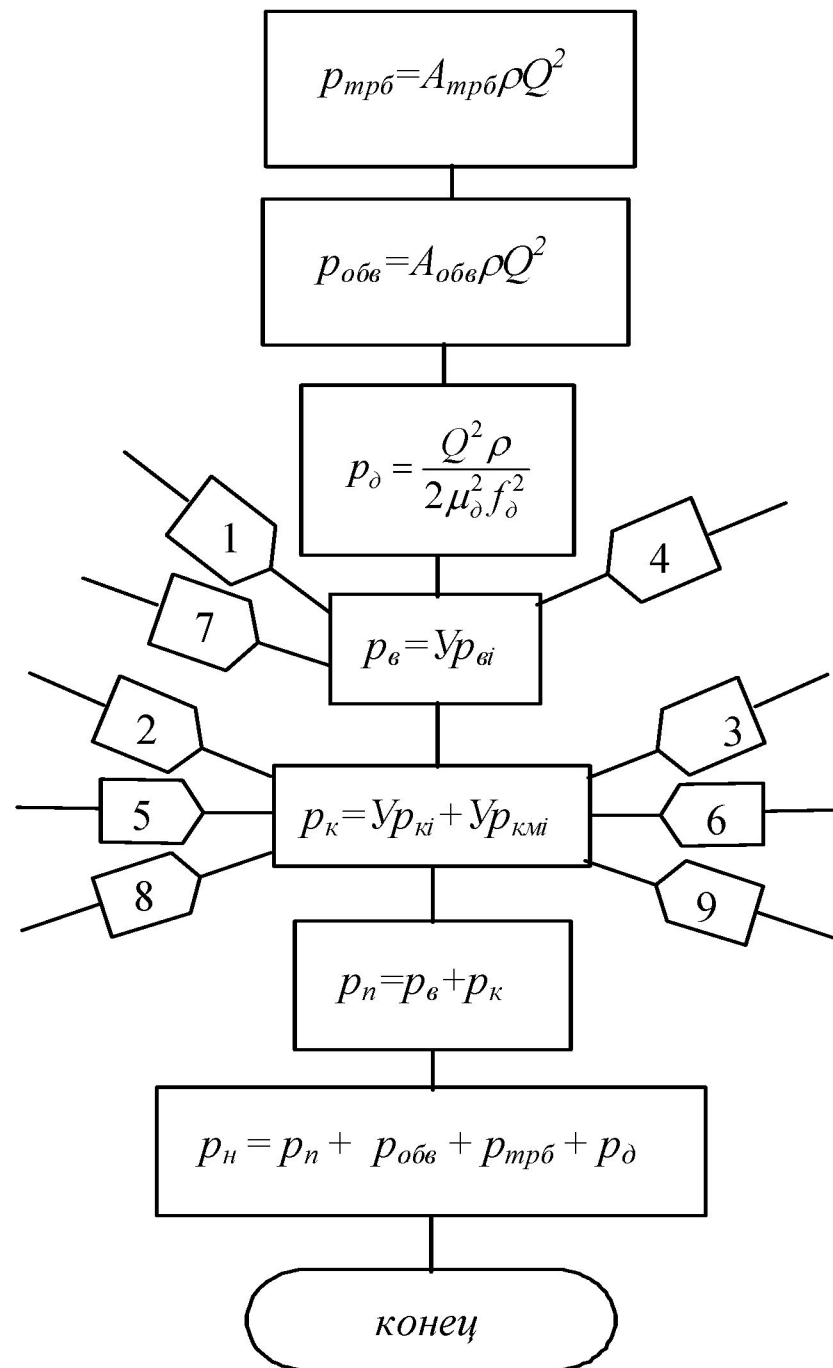
нет

$\partial a$

$$P_{км} = \left\{ 2^{2+4n} K \left[ \frac{(2n+1)Q}{\pi n (D + d_M)} \right]^n \frac{l_M}{(D - d_M)^{2n+1}} + P_{кмм} \right\} \frac{\varepsilon}{l_o}$$

$$P_{км} = \left[ \frac{0,192 Q^2 \rho l_M}{\pi^2 (D - d_M)^3 (D + d_M)^2} + P_{кмм} \right] \frac{\varepsilon}{l_o}$$

Лист 10. Давление на насосах



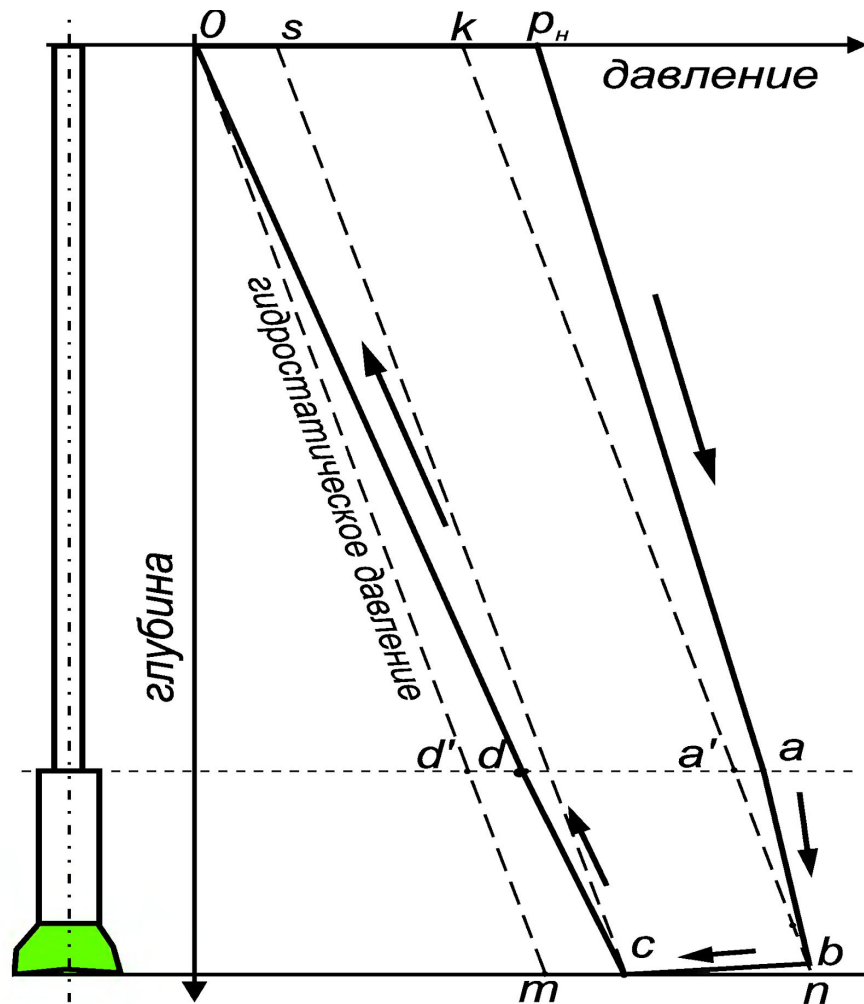


Рис. 2. График полных давлений в трубах и заколонном пространстве:

$Om$  – линия гидростатического давления столба бурового раствора;

$kn$  и  $cs$  – прямые, параллельные  $Om$ ;

$Op_n$  – отрезок, соответствующий давлению на насосах при промывке;

$kp_n$  – суммарные потери давления в трубах;

$a'a'$  – потери давления внутри УБТ;

$bc=sk$  – перепад давления на долоте;

$sm$  – суммарные потери в заколонном пространстве;

$d'd$  – потери давления за бурильными трубами.

Стрелками показано направление движения жидкости

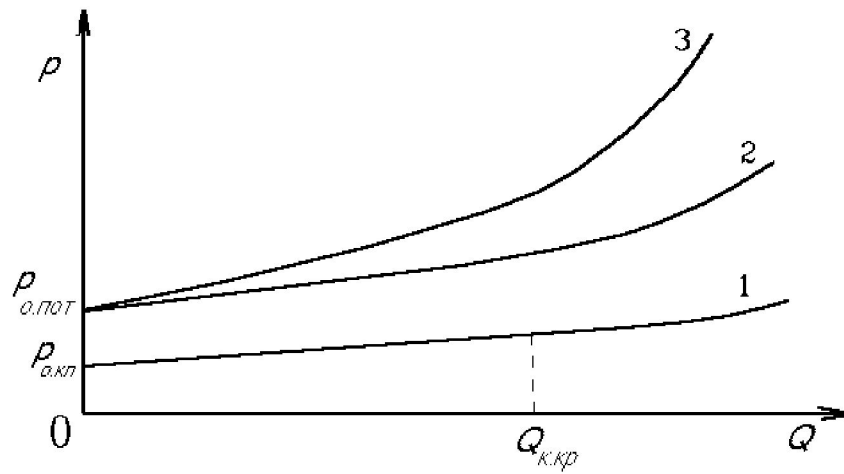


Рис. 12.1. Общий вид зависимостей  $p(Q)$  при промывке скважины вязкопластичной жидкостью: 1 – потери давления в заколонном пространстве; 2 – суммарные потери давления (сумма потерь в трубах и в заколонном пространстве); 3 – давление на насосах

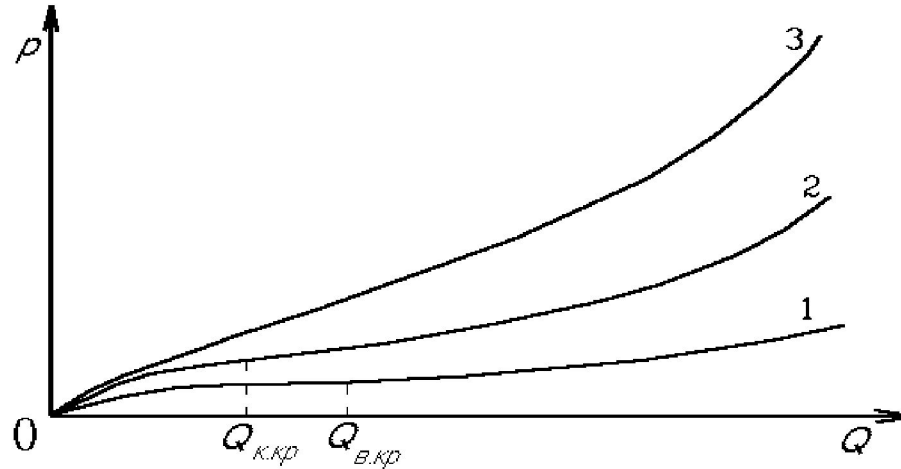
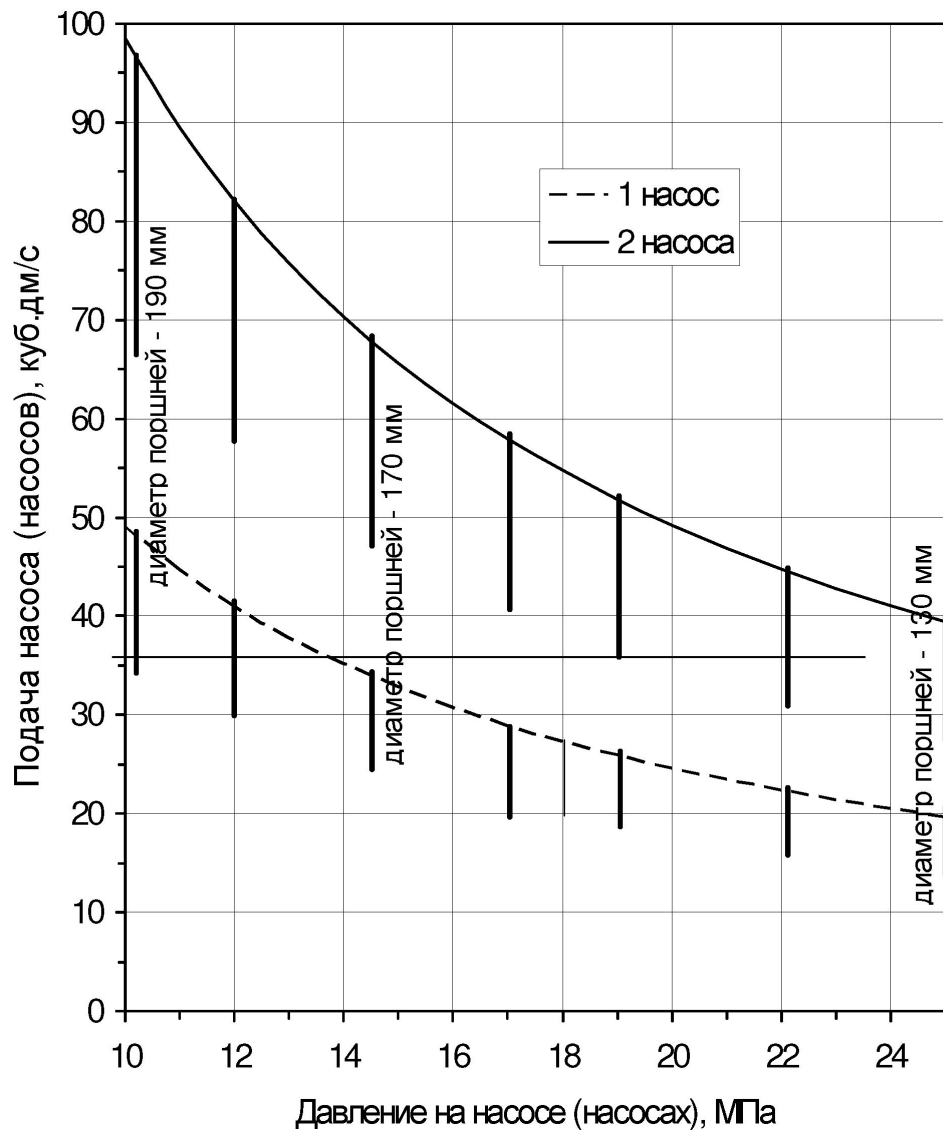


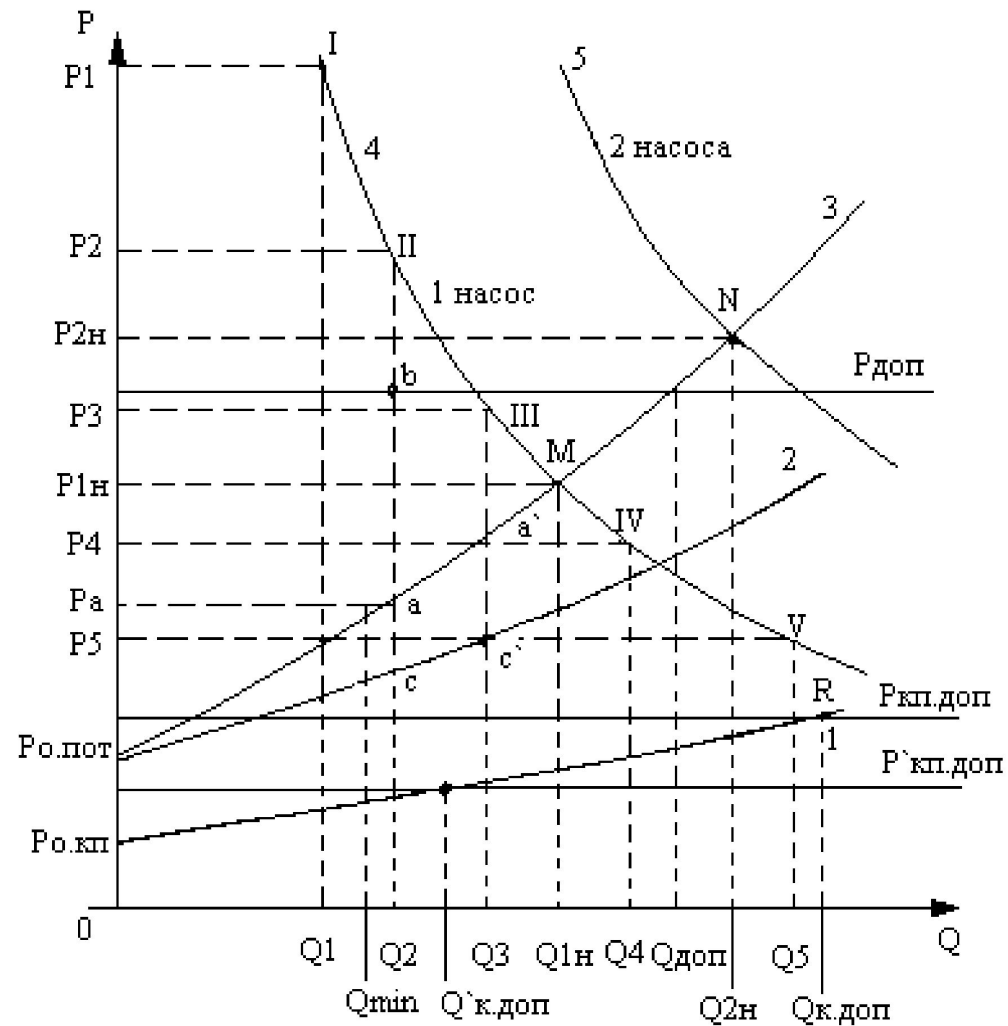
Рис. 12.2. Общий вид зависимостей  $p(Q)$  при промывке скважины псевдопластичной жидкостью: 1 – потери давления в заколонном пространстве; 2 – суммарные потери давления (сумма потерь в трубах и в заколонном пространстве); 3 – давление на насосах



# Гидравлическая характеристика буровых насосов У8-6М



# Совмещение гидравлических характеристик насосов и скважины



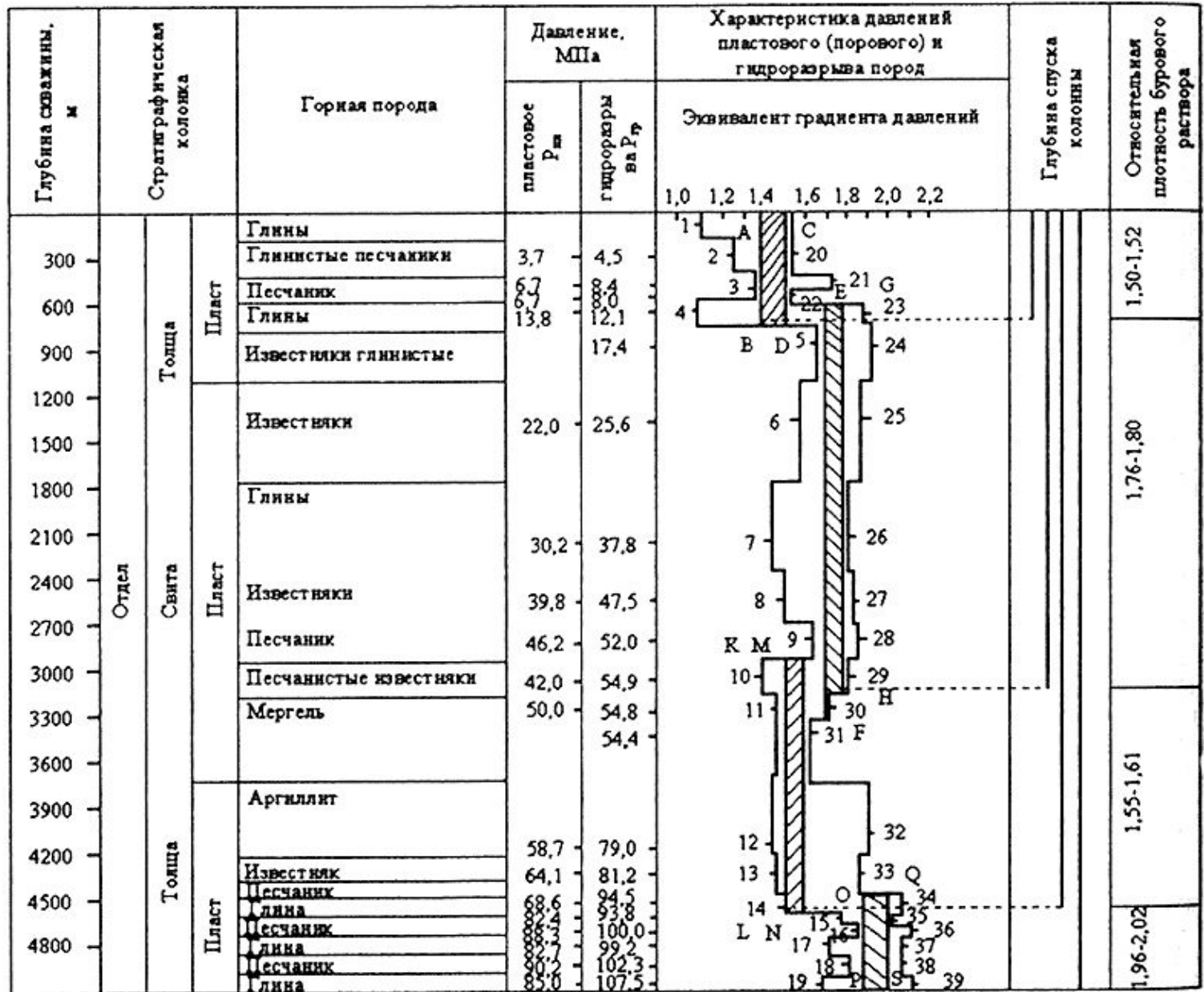
# Эквивалент градиента давления

Градиент давления:  $\Gamma = P_h/h$ ;  $\Gamma/g = P_h/gh = \rho$

Эквивалент градиента давления - это та относительная плотность некоторой жидкости, столб которой на глубине  $h$  создает давление  $P_h$  равное давлению пластовому (поровому)  $P_{пл}$ , гидроразрыва  $P_{гр}$  или столба бурового раствора  $P_{бр}$ .

При проектировании конструкции скважины строится совмещенный график изменения эквивалента градиента пластового давления, эквивалента градиента давления гидроразрыва и эквивалента градиента гидростатического давления столба бурового раствора по глубине залегания рассматриваемого горизонта.

## Пример графика эквивалентных давлений



Конец семинара