



УДК 621.22

## ОЦЕНКА УВЕЛИЧЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ЗАБОЙ СКВАЖИНЫ ПРИ ЗАПУСКЕ БУРОВЫХ НАСОСОВ



## BOTTOM HOLE PRESSURE GROWTH ESTIMATION DURING DRILLING PUMP START

**Андрианов Николай Игоревич**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент Института нефти и газа,  
Северо-Кавказский федеральный университет  
nick\_andrianov@hotmail.com

**Andrianov Nikolay Igorevich**

Candidate of technical sciences,  
Associate Professor, Associate  
Professor docent of Oil and gas institute,  
North-Caucasus federal university  
nick\_andrianov@hotmail.com

**Аннотация.** Предложены зависимости для оценки градиентов гидродинамических давлений, возникающих при восстановлении циркуляции тиксотропного бурового раствора. Численным экспериментом продемонстрировано влияние основных значащих факторов на величину градиента гидродинамического давления.

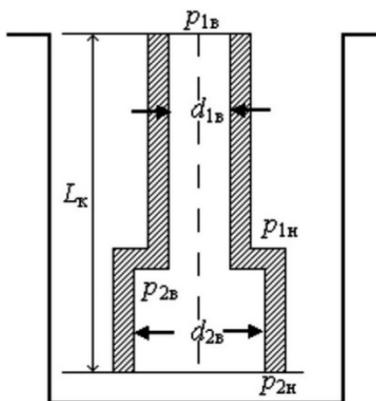
**Annotation.** Given formulas for hydrodynamic pressure gradient estimation during tixotropic drilling mud circulation start. Numerical experiment indicates the influence of general factors on hydrodynamic pressure gradient value.

**Ключевые слова:** буровая гидравлика, гидродинамическое давление на забой, восстановление циркуляции бурового раствора.

**Keywords:** drilling hydraulic, hydrodynamic bottom hole pressure, drilling mud circulation start.

**Р**ешим задачу определения величины импульса давления на забое скважины при восстановлении циркуляции тиксотропного бурового раствора. Задача является составной частью расчета «пускового давления» на буровом насосе [1] (расчетная схема представлена на рис. 1).

Кольцевое пространство образовано стенкой скважины и наружными стенками труб буровой колонны, которая состоит из секций труб двух наружных диаметров  $d_1$  и  $d_2$ . Длина секций соответственно  $l_1$  и  $l_2$ . Диаметр скважины  $D$ . Длина колонны  $L_k$ . Считаем, что плотность  $\rho$  и статическое напряжение сдвига  $\theta$  бурового раствора постоянны для внутритрубного и кольцевого пространств.



**Рисунок 1** – Расчетная схема для двухсекционной колонны буровых труб [1]

Условие предельного равновесия бурового раствора в кольцевом пространстве выражается формулой:

$$p_3 - (p_{1H} + p_{2H}) = 0, \tag{1}$$

где  $p_3$  – забойное давление, необходимое для сдвига бурового раствора в кольцевом пространстве;  $p_{1H}$  и  $p_{2H}$  – давления, необходимые для преодоления сил, вызванных статическим напряжением сдвига в кольцевом пространстве.

Определим давления  $p_{1H}$  и  $p_{2H}$ .

Для первого интервала кольцевого пространства (первой секции):

$$p_{1H} = \frac{4(\pi D + \pi d_1)\theta l_1}{\pi(D^2 - d_1^2)} = \frac{4\theta l_1}{D - d_1}. \tag{2}$$



Для второго интервала кольцевого пространства (второй секции):

$$p_{2н} = \frac{4(\pi D + \pi d_2)\theta_{1_2}}{\pi(D^2 - d_2^2)} = \frac{4\theta_{1_2}}{D - d_2} \quad (3)$$

После подстановки в формулу (1) имеем

$$p_3 = 4\theta \left( \frac{I_1}{D - d_1} + \frac{I_2}{D - d_2} \right) \quad (4)$$

При n-ом числе интервалов кольцевого пространства (секций) формула (4) принимает вид:

$$p_3 = 4\theta \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{D - d_i} \quad (5)$$

В тиксотропных буровых растворах, оставленных в состоянии покоя, происходит упрочнение структуры, характеризуемое ростом статического напряжения сдвига. Для оценки характера нарастания прочности структуры во времени измерения величины статического напряжения сдвига делаются через 1 мин ( $\theta_1$ ) и через 10 мин ( $\theta_{10}$ ) покоя. Степень нарастания структуры оценивается коэффициентом тиксотропии ( $K_T = 1 \div 2$ ) [2]:

$$K_T = \frac{\theta_{10}}{\theta_1} \quad (6)$$

Требуемая величина статического напряжения сдвига через 1 мин может быть рассчитана по формуле (7, [2]):

$$\theta_1 = 5 \left[ 2 - \exp(-110d_c) \right] d_c (\rho_n - \rho) \quad (7)$$

где  $d_c$  – диаметр шламовой частицы, удерживаемой покоящимся буровым раствором;  $\rho_n$  – плотность горной породы.

В первом приближении рассмотрим случай одноразмерной бурильной колонны.

Согласно «Инструкции по расчету бурильных колонн» [3] при диаметре обсадной колонны  $D_{ок} \leq 300$  мм наружный диаметр бурильных труб должен составлять:

$$0,46D_{ок} \leq d \leq 0,67D_{ок} - 15,0 \quad (8)$$

Здесь размерности  $d$  и  $D_{ок}$  в мм.

Считая, что диаметр ствола скважины  $D$  равен диаметру обсадной колонны  $D_{ок}$ , спущенной в нее, имеем следующий диапазон разностей ( $D - d$ ):

$$D - d = D - 0,46D = 0,54D \quad (9)$$

$$D - d = D - 0,67D + 15,0 = 0,33D + 15,0 \quad (10)$$

В формулах (9) и (10) размерность  $D$  в мм.

Плотность бурового раствора определяется согласно «Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности» [4]:

$$\rho = \frac{K P_{пл}}{gL} \quad (11)$$

где  $K$  – коэффициент превышения гидростатического давления столба бурового раствора в скважине над пластовым давлением;  $P_{пл}$  – пластовое давление на глубине  $L$ ;  $g$  – ускорение свободного падения;  $L$  – глубина.

Пластовое давление было рассчитано с использованием величины коэффициента аномальности пластового давления  $K_a$ :

$$P_{пл} = K_a \rho_v g L \quad (12)$$

где  $\rho_v$  – плотность воды.

Подстановка выражений (6), (7) и (9)–(12) в формулу (5) для случая  $n = 1$  дает следующее итоговое выражение для расчета забойного давления, способного вызвать сдвиг бурового раствора в кольцевом пространстве:

$$P_3 = \frac{2 \cdot 10^4 d_c K_T [2 - \exp(-110d_c)] (\rho_n - K K_a \rho_v) L}{[(0,33D + 15,0) \div 0,54D]} \quad (13)$$



или в форме градиента давления:

$$\frac{P_3}{L} = \frac{2 \cdot 10^4 d_c K_T [2 - \exp(-110d_c)] (\rho_n - K K_a \rho_v)}{[(0,33D + 15,0) \div 0,54D]} \tag{14}$$

В формулах (13) и (14) размерность D в мм.

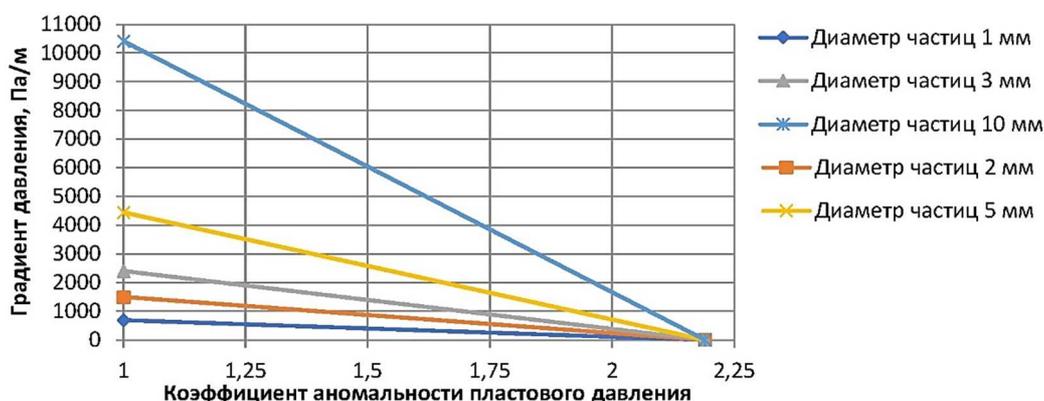
Следует отметить, что формула (14) имеет физический смысл при выполнении условия:

$$\rho_n - K K_a \rho_v > 0 \tag{15}$$

или

$$K_a > \frac{\rho_n}{K \rho_v} \tag{16}$$

Проиллюстрируем полученное выражение (14) расчетами для следующих условий:  $\rho_n = 2300 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $K = 1,05$ ;  $D = 168 \text{ мм}$ ;  $d_c = 0,001 \text{ м}, 0,002 \text{ м}, 0,003 \text{ м}, 0,005 \text{ м}, 0,010 \text{ м}$ ;  $K_T = 2$ ;  $K_a = 1,0 \div 2,1$ . Так как значения, определенные по выражениям (9) и (10) составляют диапазон 70÷90 мм, принимаем среднюю величину для подстановки в знаменатель формулы (14), равную 80 мм. Результаты расчетов отражены на рисунке 2.



**Рисунок 2** – Зависимость градиента давления, необходимого для сдвига бурового раствора в кольцевом пространстве скважины, от диаметра взвешенных шламовых частиц

Как видно из рисунка 2 градиент давления, необходимый для сдвига бурового раствора в кольцевом пространстве скважины, при прочих равных условиях увеличивается с диаметром шламовых частиц. Эта закономерность связана с увеличением статического напряжения сдвига, необходимого для удержания частиц во взвешенном состоянии.

Также прослеживается тенденция уменьшения градиента давления с ростом коэффициента аномальности пластового давления. Эта закономерность объясняется увеличением Архимедовой силы, действующей на взвешенную шламовую частицу с увеличением плотности бурового раствора, вызванной необходимостью уравновешивания возрастающего пластового давления.

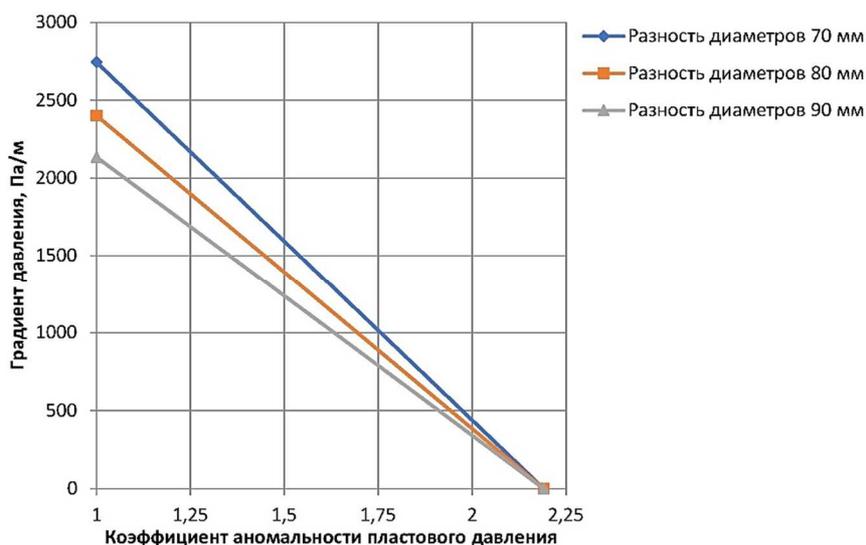
Проведем аналогичные расчеты по полученному выражению (2.14) для следующих условий:  $\rho_n = 2300 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $K = 1,05$ ;  $D = 168 \text{ мм}$ ;  $d_c = 0,003 \text{ мм}$ ;  $K_T = 2$ ;  $K_a = 1,0 \div 2,1$ . Разность диаметров скважины и бурильных труб принимаем равными 70 мм, 80 мм, 90 мм для подстановки в знаменатель формулы (14). Результаты расчетов отражены на рисунке 3.

Снижение градиента давления с увеличением зазора между стенкой скважины и бурильной колонной закономерно связано с уменьшением разности площадей цилиндрических поверхностей, вдоль которых будет происходить сдвиг бурового раствора. Следовательно, уменьшится и необходимое усилие сдвига, оцениваемое через давление.

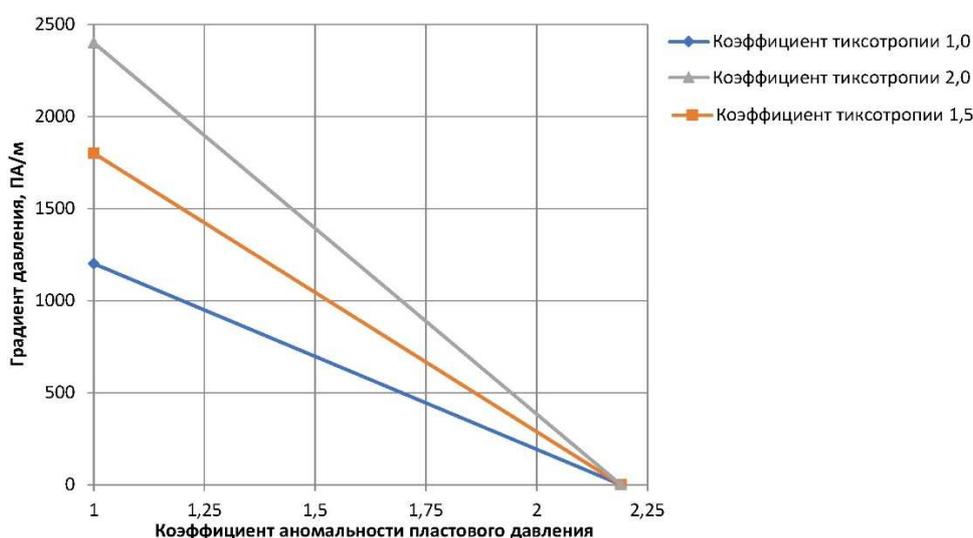
Проведем аналогичные расчеты по полученному выражению (14) для следующих условий:  $\rho_n = 2300 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $K = 1,05$ ;  $D = 168 \text{ мм}$ ;  $d_c = 0,003 \text{ мм}$ ;  $K_T = 1, 1,5 2$ ;  $K_a = 1,0 \div 2,1$ . Разность диаметров скважины и бурильных труб принимаем равным 80 мм для подстановки в знаменатель формулы (14). Результаты расчетов отражены на рисунке 4.

Полученный график отражает закономерное увеличение градиента давления с ростом коэффициента тиксотропии, то есть увеличением величины статического напряжения сдвига, измеренного через 10 мин покоя раствора.

Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании конструкции скважины, составлении гидравлической программы промывки и в других проектных и инженерных расчетах.



**Рисунок 3** – Зависимость градиента давления, необходимого для сдвига бурового раствора в кольцевом пространстве скважины, от разности диаметров скважины и бурительных труб



**Рисунок 4** – Зависимость градиента давления, необходимого для сдвига бурового раствора в кольцевом пространстве скважины, от коэффициента тиксотропии бурового раствора

**Литература**

1. Бабаян Э.В. Буровая гидравлика : учебное пособие. – М. : Инфра-Инженерия, 2018. – 156 с.
2. Булатов А.И. Решение практических задач при бурении и освоении скважин. – Краснодар : Просвещение-Юг, 2006. – 502 с.
3. Даниленко О.В. Инструкция по расчету бурительных колонн для нефтяных и газовых скважин : Руководящий документ / О.В. Даниленко, К.Н. Джафаров, В.Г. Колесников. – М. : 1997. – 156 с.
4. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности : Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности (утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 12.03.2013 № 101). – М. : НТЦ «Промышленная безопасность», 2013. – 312 с.

**References**

1. Babayan E.V. Drilling hydraulics: a training manual. – M. : Infra-Engineering, 2018. – 156 p.
2. Bulatov A.I. The solution of practical problems at drilling and development of wells. – Krasnodar : Enlightenment-South, 2006. – 502 p.
3. Danilenko O.V. Instruction for calculation of drilling strings for oil and gas wells : Guidance Document / O.V. Danilenko, K.N. Dzhaifarov, V.G. Kolesnikov. – M. : 1997. – 156 p.
4. Safety rules in the oil and gas industry : Federal norms and regulations in the field of industrial safety (approved by Order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision from 12.03.2013 № 101). – M. : Scientific and technical center «Industrial safety», 2013. – 312 p.