

УДК 622.24

## О совершенствовании методики гидравлического расчёта геологоразведочных скважин

Каракозов А. А.<sup>\*</sup>, Попова М. С., Парфенюк С. Н., Копытков-Баскаков Д. В.

*Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина*

Поступила в редакцию 23.09.10, принята к печати 29.10.10.

### Аннотация

Рассмотрены проблемные вопросы определения потерь давления при колонковом бурении геологоразведочных скважин. Показана необходимость обязательного учёта влияния вращения буровой колонны на коэффициент гидравлических сопротивлений в скважине.

Ключевые слова: скважина, вращение, промывка, потери давления.

Использование передовых технологий бурения при ограниченных возможностях геологоразведочных буровых насосов значительно ужесточает требования к точности гидравлического расчёта скважин. Кроме того, определение потерь давления при циркуляции промывочной жидкости связано с решением широкого круга задач колонкового бурения по математическому описанию рабочего цикла скважинных гидравлических устройств и их проектированию. Существующая в настоящее время методика гидравлического расчёта геологоразведочных скважин уже давно не соответствует уровню современных исследований в области буровой гидравлики и требует уточнений.

В практике колонкового бурения до сих пор [1] используется широко известная по справочной и учебной литературе [2, 3] методика гидравлического расчёта, основы которой были опубликованы Б. И. Воздвиженским ещё в 1943 году. В дальнейшем в неё были внесены уточнения, основанные на исследованиях Р. И. Шищенко, Б. И. Есьмана, Б. И. Мительмана и др. [4, 5], проведенных для условий бурения нефтяных и газовых скважин. За последние сорок лет эта методика практически не претерпела существенных изменений. Одной из особенностей этой методики является расчёт потерь давления в кольцевом пространстве скважины без учёта вращения буровой колонны, несмотря на то, что имеются убедительные экспериментальные данные, свидетельствующие о неправомерности такого подхода для условий колонкового бурения [6, 7, 8]. Кроме того, практика хорошо известно о влиянии вращения колонны на гидравлические сопротивления в скважине, поскольку при алмазном бурении взвешивание бурового снаряда рекомендуется производить **обязательно** с подачей промывочной жидкости в скважину и **вращением** буровой колонны (для учёта влияния гидравлического подпора при взвешивании).

Следует отметить, что результаты работы [6], полученные при бурении скважин снарядами ССК, в более поздней редакции существующей методики расчёта [1, 3] всё же рекомендуются для уточнения гидравлических сопротивлений «при высокочастотном алмазном бурении». С одной стороны, такая рекомендация достаточно расплывчата и её применение субъективно, с другой стороны, нет обоснования для применения зависимости, полученной для специфических условий, на всю область колонкового бурения.

В то же время, эта рекомендация свидетельствует о признании необходимости уточнения коэффициента гидравлических сопротивлений в кольцевом пространстве  $\lambda$ , предварительно рассчитанного для невращающейся колонны по модифицированной формуле Альтшуля [1, 3]. Влияние вращения буровой колонны авторами работы [6] было предложено учитывать по формуле:

---

\* Для переписки: karakozov@donntu.edu.ua

$$\lambda' = \lambda \sqrt{1 + 0,45(w/v)^2}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость течения жидкости;  $w$  – окружная скорость вращения на поверхности бурильных труб,  $w = \pi dn/60$ ;  $d$  – наружный диаметр бурильных труб;  $n$  – частота вращения бурильной колонны, об/мин.

Анализ формулы (1) для условий колонкового бурения показывает, что отличие между коэффициентами  $\lambda$  и  $\lambda'$  может быть весьма существенным, приводя к значительному изменению результатов гидравлического расчёта конкретных скважин. Поэтому учёт влияния вращения бурильной колонны на коэффициент гидравлических сопротивлений в кольцевом пространстве геологоразведочной скважины имеет важное прикладное значение.

Целью настоящей статьи является оценка влияния вращения бурильной колонны на режим течения жидкости и гидравлические сопротивления в кольцевом пространстве геологоразведочной скважины, которая может быть использована при совершенствовании методики её гидравлического расчёта.

Известны результаты экспериментальных исследований Е. Г. Леонова и В. И. Исаева, опубликованные даже в учебной литературе [7], которые позволяют установить влияние вращения бурильной колонны на критическое значение числа Рейнольдса  $Re_{кр}$ , определяющего переход от ламинарного в турбулентный режим течения жидкости. Если число Рейнольдса  $Re < Re_{кр}$ , то вращение не влияет на режим течения и потери давления в кольцевом пространстве скважины. При этом коэффициент гидравлических сопротивлений  $\lambda$  определяется по формуле для ламинарного течения в канале с неподвижными стенками ( $\lambda = 64/Re$ ). Если  $Re > Re_{кр}$ , то коэффициент гидравлических сопротивлений  $\lambda$  определяется по формуле для турбулентного течения в канале с вращающейся стенкой [7]:

$$\lambda = \frac{0,3385}{\sqrt[4]{Re}} \left[ 1 + \frac{0,5\delta}{1-\delta} \left( \frac{Ta}{Re} \right)^2 \right]^{0,535}, \quad (2)$$

где  $\delta = d/D$ ;  $D$  – диаметр скважины;  $Ta$  – число Тейлора;  $Re$  – число Рейнольдса.

$$Ta = 0,5 \sqrt{\frac{1-\delta}{\delta}} \frac{w(D-d)\rho}{\mu}; \quad (3)$$

$$Re = \frac{v(D-d)\rho}{\mu}, \quad (4)$$

где  $\rho$ ,  $\mu$  – соответственно, плотность и динамическая вязкость промывочной жидкости.

Учитывая выражения для определения чисел Тейлора и Рейнольдса (3) и (4), формулу (2) можно преобразовать к виду:

$$\lambda = \frac{0,3385}{\sqrt[4]{Re}} \left[ 1 + 0,125 \left( \frac{w}{v} \right)^2 \right]^{0,535} \quad (5)$$

Графическая зависимость критического числа Рейнольдса от числа Тейлора, полученная на основании экспериментальных данных [7], может быть аппроксимирована следующими выражениями:

при  $Ta < 160$ :

$$Re_{кр} = 0,0304Ta^2 - 12,631Ta + 2095,8; \quad (6)$$

при  $160 \leq Ta \leq 260$ :

$$Re_{кр} = 2,866 \cdot 10^{-5} Ta^4 - 0,02631Ta^3 + 8,98281Ta^2 - 1363,36Ta + 77945; \quad (7)$$

при  $260 \leq Ta \leq 700$

$$Re_{кр} = -0,0003Ta^2 + 0,1185Ta + 150,7. \quad (8)$$

При этом величина достоверности аппроксимации составляет  $R^2=0,9889 \div 1$ . При  $Ta > 700$  критическое число Рейнольдса можно принимать равным 80.

Следует отметить, что результаты, полученные Е. Г. Леоновым и В. И. Исаевым, в практике гидравлических расчётов роторного бурения на нефть и газ не используются. Это объясняется тем, что даже при максимально возможных частотах вращения ротора буровых установок и минимальных подачах промывочной жидкости увеличение коэффициента гидравлических сопротивлений не может превышать 40 % (в реальных условиях эта поправка обычно находится в пределах 8–15 %). Учитывая, что потери давления в кольцевом пространстве нефтяных и газовых скважин обычно значительно меньше других составляющих общих потерь давления, то подобное увеличение гидравлических сопротивлений при инженерном расчёте вполне учитывается коэффициентом запаса.

Для условий геологоразведочного бурения, отличающихся сравнительно небольшими зазорами между скважиной и трубами, гораздо меньшей удельной подачей промывочной жидкости и более высокими частотами вращения бурового снаряда, ситуация будет совершенно другая.

Например, требуют пересмотра рекомендации о выборе режима течения промывочной жидкости без учёта вращения бурильной колонны. Учитывая зависимости (6)–(8), для весьма малой (для условий геологоразведочного бурения) частоты вращения бурильной колонны 100 об/мин была определена подача промывочной жидкости, при которой возникает турбулентное течение в кольцевом зазоре между скважиной и бурильными трубами (табл. 1). Аналогичный расчёт проведен и для кольцевого зазора между скважиной и колонковыми трубами для нескольких относительно невысоких частот вращения бурового снаряда (табл. 2).

Табл. 1. Подача промывочной жидкости, при которой число Рейнольдса превышает критическое значение в зазоре между скважиной и бурильными трубами, л/мин

Диаметр бурильных труб, мм	Диаметр скважины, мм						
	46	59	76	93	112	132	151
42	4	0,5	0,5	1	1	1	1
50	–	1	0,5	1	1	1	1
54	–	2	1	1	1	1	1
63,5	–	–	1	1	1	1	1
68	–	–	1	1	1	1	1

Табл. 2. Подача промывочной жидкости, при которой число Рейнольдса превышает критическое значение в зазоре между скважиной и колонковыми трубами, л/мин

Частота вращения, об/мин	Диаметр скважины/колонковой трубы, мм						
	46/44	59/57	76/73	93/89	112/108	132/127	151/146
100	7	8,5	7,5	2,5	3	2	2,5
150	6	7	4	1,5	2	2	2
200	5	6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Из табл. 1 и 2 видно, что при обычной промывке скважины при колонковом бурении режим течения жидкости в кольцевых зазорах между скважиной и бурильными и колонковыми трубами всегда будет турбулентным, поскольку минимальная подача жидкости в реальных условиях составляет 12 л/мин (исходя из характеристики серийных геологоразведочных насосов). Поэтому в учёте ламинарного течения жидкости при обычном гидравлическом расчёте геологоразведочной скважины нет необходимости. Его целесообразно учитывать в особых случаях, например, при описании рабочего цикла специальных насосов, периодически разгоняющих жидкость в скважине из состояния покоя.

На рис. 1 и 2 показаны зависимости коэффициента гидравлических сопротивлений от расхода жидкости для бурильной колонны диаметром 50 мм: невращающейся (нижние кривые) и вращающейся с частотой 100 об/мин (верхние кривые).

Анализ этих зависимостей показывает, что для условий геологоразведочных скважин даже при малых частотах вращения наблюдаются различия между коэффициентами гидравлических

сопротивлений. При этом наибольшие различия имеют место при подаче промывочной жидкости, близкой к минимальным значениям (расхождение может достигать 25–75 %, увеличиваясь, при прочих равных условиях, с ростом площади зазора). При увеличении подачи жидкости влияние вращения на значение коэффициента гидравлических сопротивлений снижается. При максимальной подаче геологоразведочного насоса 320 л/мин увеличение коэффициента гидравлических сопротивлений составляет примерно 4–8 %, причём большие значения отклонений также относятся к большим кольцевым зазорам.

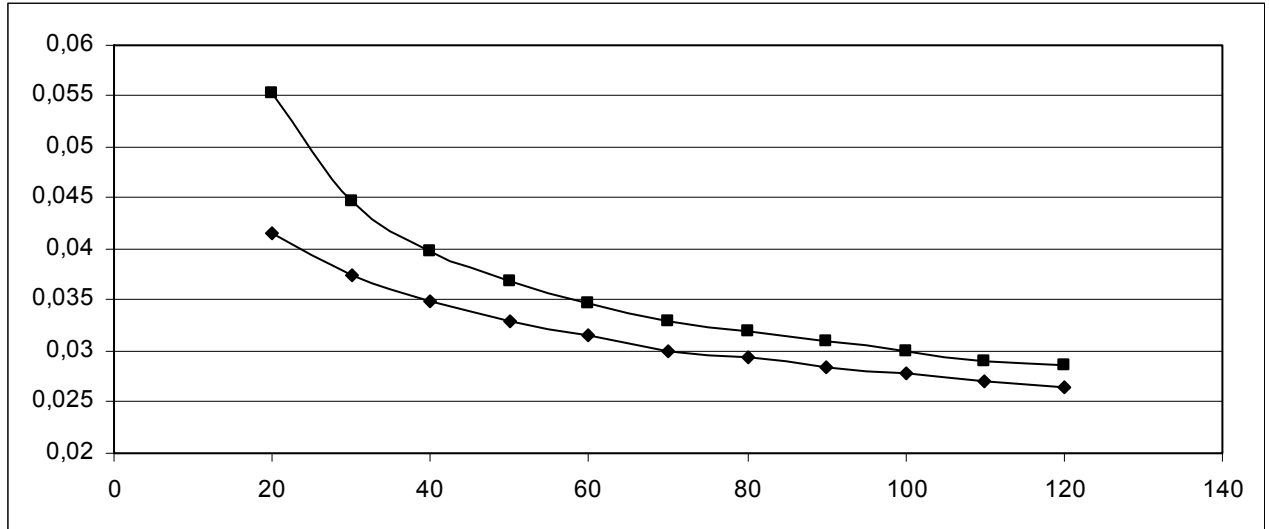


Рис. 1. Значения коэффициентов гидравлических сопротивлений для скважины диаметром 76 мм.

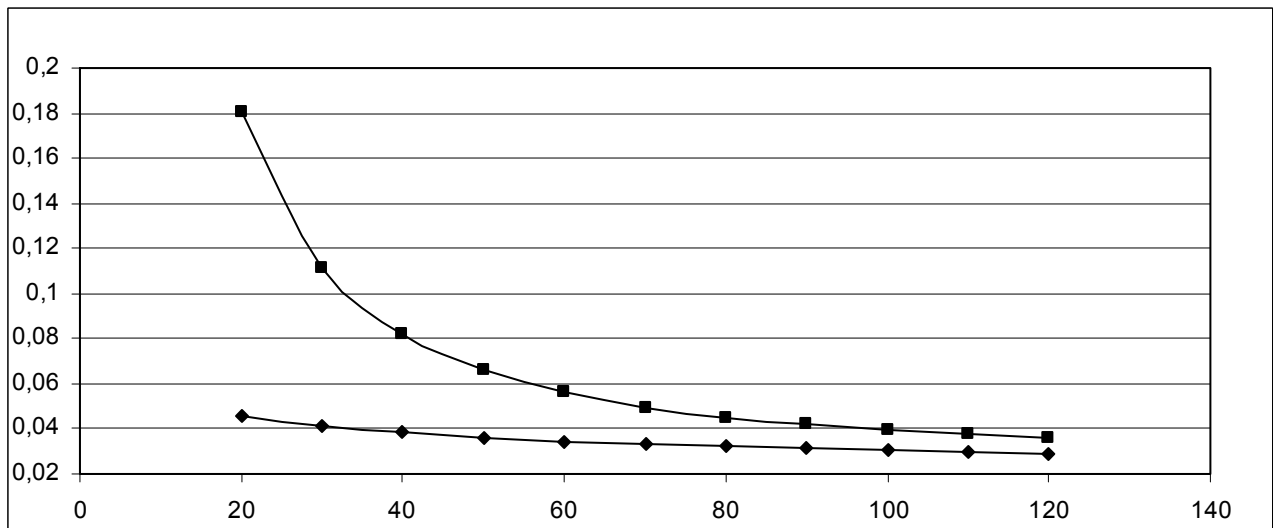


Рис. 2. Значения коэффициентов гидравлических сопротивлений для скважины диаметром 132 мм.

Увеличение частоты вращения бурового снаряда приводит к ещё большему расхождению между значениями коэффициентов гидравлических сопротивлений. Например, для скважины диаметром 76 мм эти расхождения будут достаточно сильными при расходах жидкости до 70 л/мин, т. е. при режиме промывки, рекомендуемом для большинства серийных коронок. На рис. 3 показано изменение графиков с рис. 1 при увеличении частоты вращения со 100 до 300 об/мин. При этом для скважины диаметром 76 мм коэффициент гидравлических сопротивлений с учётом вращения увеличивается в пределах 30–60 %. При прочих равных условиях наблюдается больший рост коэффициента гидравлических сопротивлений с увеличением диаметра скважины.

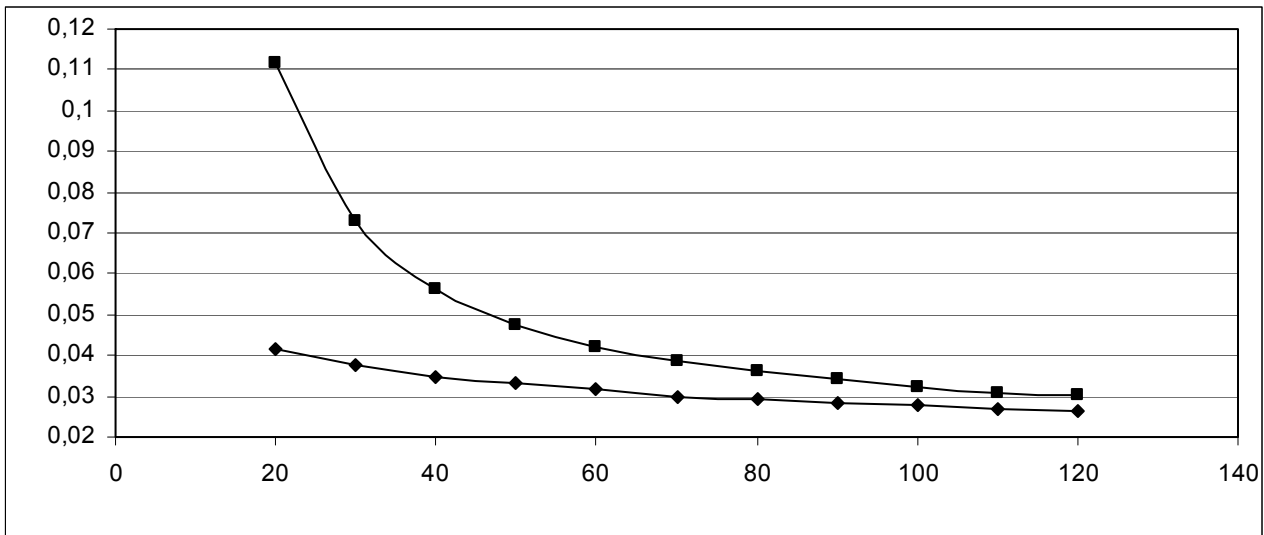


Рис. 3. Значения коэффициентов гидравлических сопротивлений для скважины диаметром 76 мм при частоте вращения 300 об/мин.

Расчёты также показывают, что с увеличением частоты вращения гидравлические сопротивления могут возрастать в несколько раз. На рис. 4 показана зависимость изменения коэффициента гидравлических сопротивлений от частоты вращения бурового снаряда (для скважины диаметром 93 мм, бурильных труб диаметром 50 мм и подачи жидкости 70 л/мин).

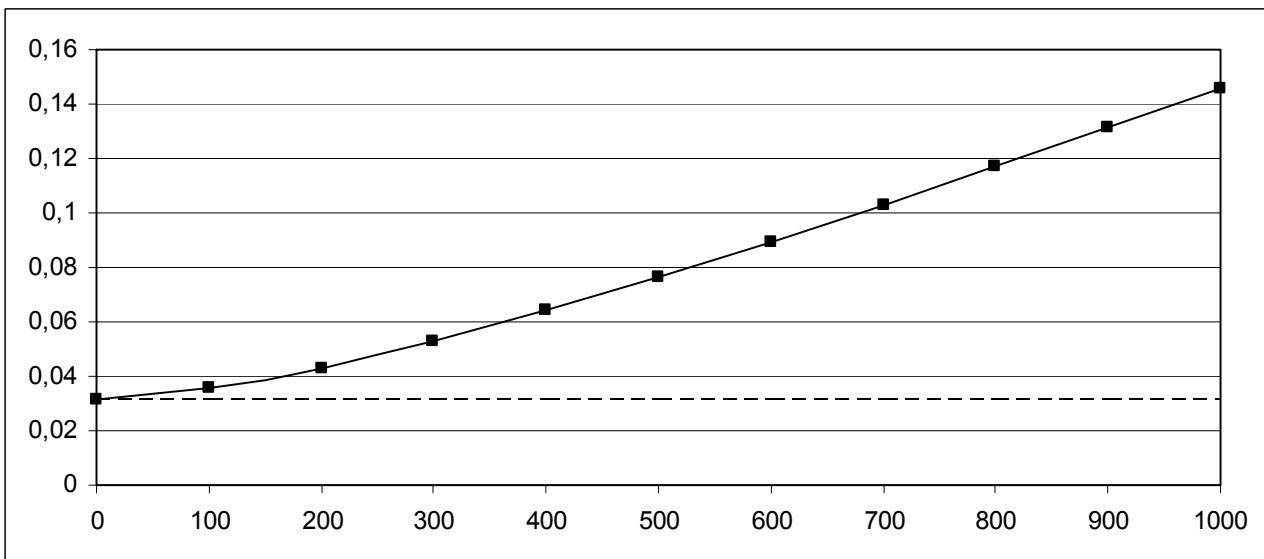


Рис. 4. Зависимость коэффициента гидравлических сопротивлений от частоты вращения бурового снаряда.

Анализ зависимости рис. 4 показывает, что при разгоне бурильной колонны из состояния покоя до 1000 об/мин, коэффициент гидравлических сопротивлений возрастает в 3,66 раза. Даже для сравнительно небольших частот вращения 200–400 об/мин рост этого коэффициента составляет 37–105 %. Это свидетельствует о существенности влияния частоты вращения бурового снаряда на гидравлические сопротивления в скважине.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

1. При гидравлическом расчёте колонкового бурения геологоразведочных скважин во всех случаях следует обязательно учитывать влияние вращения бурильной колонны на коэффициент гидравлических сопротивлений в кольцевом пространстве скважины.

2. При колонковом бурении даже при минимальных подачах геологоразведочных насосов в кольцевом пространстве скважины никогда не будет ламинарного течения промывочной жидкости. Поэтому коэффициент гидравлических сопротивлений необходимо рассчитывать по формулам для турбулентного течения – (1) для снарядов ССК или (5) для остальных случаев.
3. Существующие рекомендации по учёту вращения бурильной колонны проработаны для ньютоновских жидкостей. Необходима постановка исследований для получения точных соотношений для расчётов коэффициентов гидравлических сопротивлений в кольцевом пространстве скважины для неньютоновских жидкостей. Пока такие исследования не проведены, для неньютоновских жидкостей можно попытаться применить зависимости, аналогичные формулам (1) и (5), поскольку подобный подход успешно используется в практике гидравлических расчётов в бурении [7].

### Библиографический список

1. Расчёты в бурении: Справочное пособие / Под. ред. А.Г. Калинина. – М.: РГГРУ, 2007. – 668 с.
2. Ивачёв Л. М. Промывочные жидкости в разведочном бурении. – М.: Недра, 1975. – 216 с.
3. Промывка и тампонирувание геологоразведочных скважин: Справочное пособие. – М.: Недра, 1989. – 247 с.
4. Шищенко Р. И., Есьман Б. И. Практическая гидравлика в бурении. – М.: Недра, 1966. – 360 с.
5. Мительман Б. И. Справочник по гидравлическим расчётам в бурении. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 236 с.
6. Запевалов И. А., Бухалов В. М. Потери давления в кольцевом пространстве при бурении снарядами ССК и промывке водой / Труды ВИТР. – №97. – Л.: ВИТР, 1975. – С. 8-14.
7. Леонов Е. Г., Исаев В. И. Гидроаэромеханика в бурении: Учебник для вузов. . – М.: Недра, 1987. – 304 с.
8. Гукасов Н. А., Бруховецкий О. С., Чихоткин В. Ф. Гидродинамика в разведочном бурении: Учебное пособие для вузов. . – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999. – 304 с.

© Каракозов А. А., Попова М. С., Парфенюк С. Н., Копытков-Баскаков Д. В., 2011.

#### Анотація

Розглянуто проблемні питання визначення втрат тиску при колонковому бурінні геологорозвідувальних свердловин. Вказано на необхідність обов'язкового врахування обертання бурильної колони на коефіцієнт гідралічного опору в свердловині.

Ключові слова: свердловина, обертання, промивання, втрати тиску.

#### Abstract

Problems of estimation of flushing fluid pressure for core drilling are reviewed. Results shows that rotation of a drill string must be considered for pressure estimation

Keywords: borehole, rotation, flushing, pressure.