УДК 622

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ЕЁ КОНТАКТА СО СТЕНКОЙ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОЙ СКВАЖИНЫ

TO THE QUESTION OF DETERMINING THE DRAG FORCES ON THE SURFACE OF THE DRILL STRING IN CONTACT WITH THE WALL DIRECTIONAL WELL

Проводников Геннадий Борисович
кандидат технических наук,
почетный нефтяник объединения «Сургутнефтегаз»,
ветеран труда ОАО «Сургутнефтегаз»,
обладатель благодарности Министерства энергетики РФ,
ветеран труда России

Дюсюнгалиев Марат Александрович
заместитель директора
научно-исследовательского и проектного института
«СургутНИПИнефть» по бурению

Аннотация. Данная статья знакомит читателей с одной из главных проблем при строительстве скважин – определением силы сопротивления движению бурильной колонны на поверхности её контактасо стенкой наклоннно-направленной скважины. Этой проблемой не в малой мере занимался профессор А.И. Булатов, так как при креплении скважины большое значение приобретает успешностьспуска в наклонно-направленную скважинуобсадных труб с оснасткой, включающей центраторы, цементировочные муфты и другие технические средства.
В настоящей статье приводится развитие идеологии учета и расчета сил сопротивления в скважине в зависимости от различных технологических факторов, в продолжение работ А.И. Булатова и его сподвижников.
Большой интерес специалистов в области строительства наклонно-направленных и горизонтальных скважин могут вызвать освещаемые в статье важные аспекты в изучении и определении сил сопротивления при движении бурильной колонны в скважине. Авторами затронут вопрос определения расчетным способом сил сопротивления в наклонно-направленной скважине на основе регистрируемых нагрузок на крюке в процессе подъемаи спускабурильной колонны. При автоматизированном подходе получение значений сил сопротивления в скважине в реальном времени представляет особый научный интерес для их оперативного снижения и предупреждения осложнений при строительстве скважин в Западной Сибири.

Ключевые слова: силы сопротивления, коэффициент сопротивления, сила натяжения, прижимающая сила, нагрузка на крюке, бурильная колонна, профили наклонно-направленных скважин, смазочная способность бурового раствора, факторы, расчеты, методика, строительство скважин, результаты промысловых исследований, Среднее Приобье, Западная Сибирь.

Provodnikov Gennady Borisovich
Candidate of Technical Sciences,
Honorary Oilman
of Surgutneftegaz Association,
Veteran of Labour of Surgutneftegaz JSC,
Commendation of the Ministry of Energy
of the Russian Federation,
Veteran of Labor of Russia

Dyusyungaliev Marat Alexandrovich
Deputy Director,
Research and Design Institute
«SurgutNIPIneft» on Drilling

Annotation. The article is acquainted with one of the main problems of well construction – determination of resistance force of drill string on the surface of its contact with the wall of a directional well. This problem has not been insignificantly studied by professor A.I. Bulatov, because when cementing a well the success of running casing into a directional well with accessories, including centralizers, cementing sleeves and other technical means, is of great importance.
This paper is a continuation of the work of A.I. Bulatov and his associates in developing the ideology of considering and calculating the drag forces in the borehole, depending on various technological factors.
The important aspects in studying and determining of drag forces at movement of a drill-string in a borehole may arouse a great interest of specialists in the field of directional and horizontal well construction. The authors touch upon the problem of determining by computational method the drag forces in a directional well on the base of registered loads on a hook in the process of penetration and descent of drilling string. With the automated approach, to obtain the values of drag forces in the borehole in real time is of particular scientific interest for their operative reduction and prevention of complications during the construction of wells in Western Siberia.

Keywords: drag forces, drag coefficient, tension force, hook load, drill string, directional well profiles, drilling mud lubricity, factors, calculations, methodology, well construction, results of field studies, Middle Priobie, Western Siberia.

Фундаметальному изучению и определению сил сопротивления движению бурильной колонны на поверхности её контакта со стенкой скважины посвящены работы известных ученых Александрова М.М. [1], Бронзова А.С., Васильева Ю.С. [2], Муллагалиева Р.Т. [3]. Однако в условиях месторождений Западной Сибири, при кустовом бурении, где отклонения забоев от верти-

кали достигают значительных величин при высоких скоростях бурения и силы сопротивления по стволу могут значительно меняться в коротких диапазонах углубления скважины, применение классических методов для их определения представляет значительные трудности.

На протяжении более пятидесяти лет при проводке наклонно-направленных скважин, а в последние десятилетия и горизонтальных, в зависимости от условий разработки месторождений и сетки разбуривания, проектируются и выбираются типы профилей (вертикальные и горизонтальные проекции) и производится расчет траектории проложения оси скважины в пространстве. В настоящее время в основном применяются профили обычного типа пяти разновидностей, приведенные в литературном источнике [4].

Профиль А, состоящий из вертикального участка (1), участка набора необходимого максимального угла наклона скважины (2) и прямолинейного наклонного участка (3), продолжающегося до проектной глубины;

Профиль Б, состоящий из вертикального участка (1), участка набора необходимого максимального угла наклона скважины (2) и участка естественного снижения угла наклона скважины (4);

Профиль В, состоящий из пяти участков – вертикального (1), набора угла наклона скважины (2), прямолинейного наклонного (3), естественного снижения угла наклона скважины (4) и вертикального участка (1а);

Профиль Г, состоящий из вертикального участка (1), участка набора угла наклона скважины (2), участка естественного снижения угла наклона скважины (4) и вертикального участка (1г).

Профиль Д, состоящий из вертикального участка (1) и участка набора угла наклона скважины (2).

При этом профиль Д применяется в настоящее время при бурении горизонтальных скважин до набора зенитного угла 90 градусов при вхождении в продуктивный пласт. Кроме того, участок набора угла включает множество участков стабилизации угла наклона в зависимости от расчета проектной траектории ствола скважины.

Согласно работе автора [3],посвященной изучению сил сопротивления для условий нефтяных месторождений Западной Сибири, где отклонения забоев наклонных скважин от вертикали достигают значительных величин, силу сопротивления Т в каждом интервале применяемых профилей можно рассматривать как произведение прижимающей силы F бурильной колонны на коэффициент сопротивления f.

Прижимающая сила в искривленном участке создается нормальной составляющей веса бурильных труб $P_ж$ в жидкости с учетом тяжелого низа компоновки. Кроме того, присутствует сила натяжения Q бурильной колонны, направленная вдоль оси скважины и является составляющей веса бурильных труб $P_ж$ в жидкости.

По данным [3], сила сопротивления Т, прижимающая сила F и сила натяжения Q для каждого n-го участка (1, 3, 4) выше указанных профилей наклонно-направленных скважин со средним углом наклона α определяется по приближенным формулам:

$$Tn = Fnf;\ Fn = P_ж Sinα;\ Qn = P_ж Cosα.$$

Для участка набора угла (2):

$$Tн = Fн\ f;\ Fн = Pнβ,$$

где Рн – сила натяжения колонны в конце участка от веса бурильных труб, включая тяжелый низ, в жидкости; β – угол охвата участка икривления в радианах.

$$β = l / r,$$

где l – длина участка набора угла; r – радиус участка набора угла.

Значение коэффициента сопротивления f зависит от ряда факторов: механических свойств пород; параметров бурового раствора, включая его смазывающую способность, состояние ствола скважины, интесивность искривления ствола скважины и т.д. Поэтому для разных применяемых профилей и для разных участков ствола скважины коэффициент сопротивления имеет разные значения. По данным [3], на основе замеров сил сопротивления, проведенных в бурящихся наклонно-направленных скважинах Усть-Балыкского месторождения, рекомендуются следующие значения коэффициента сопротивления: в интервале, обсаженном кондуктором, f = 0,2; в открытом стволе до глубины 900–1000 м (по вертикали) – f = 0,18–0,35; ниже глубины 1000 м – f = 0,4.

В интервале 400–1000 м залегают в основном глины, имеющие небольшую прочность. Под действием прижимающих сил бурильные замки вдавливаются в стенки скважины, что вызывает дополнительные силы сопротивления движению бурильной колонны. По мере роста прижимающей силы растет и коэффициент сопротивления, поэтому при больших зенитных углах и особенно при наличии перегибов ствола скважины в данном интервале следует ожидать резкое увеличение значений коэффициента сопротивления.

В настоящее время применяемые буровые растворы обладают повышенной смазочной способностью за счет применения высокоэффективных смазок. Однако большое значение для своевременного ввода смазки в буровой раствор имеют показания значений в реальном времени коэффициента сопротивления в скважине. В результате, из-за несвоевременного ввода смазки, возникают осложнения в скважине: затяжки и посадки бурильного инструмента с последующими возможными авариями, связанными с прихватами.

Главной целью данной статьи является следующее. В бурящейся скважине, на основе имеющихся оперативных данных замеров нагрузок на крюке G1 и G2 соответственно при подъеме и спуске бурильного инструмента в период его наращивания, оперативно определять (или регистрировать) силу сопротивления бурильного инструмента. Затем на основании полученных данных обеспечить оперативное управление значением этого параметра. При регистрации тенденции его увеличения осуществить ряд технологических мероприятий по его снижению, включающих дополнительную обработку бурового раствора смазывающей добавкой, увеличение времени промывки перед наращиванием бурильного инструмента, снижениеинтенсивности искривления скважины при корректировке параметров кривизны ствола скважины и др.

Для решения задачи определения сил сопротивления в бурящейся скважине на основе указанных исходных данных определяем силы сопротивления T1 и T2 при движении бурильного инструмента соответственно вверх и вниз с учетом суммарной силы

ΣQn натяжения бурильной колонны, направленной вдоль оси скважины:

$$T1 = G1 – \Sigma Qn;\ T2 = \Sigma Qn – G2.$$

Принимаем, что силы сопротивления при движении бурильного инстумента вверх и вниз равны, тогда

$$G1 – \Sigma Qn = \Sigma Qn – G2.$$

После преобразования данного уравнения получаем

$$(G1 + G2) / 2 = \Sigma Qn.$$

Определяем силу сопротивления T1 с учетом замера нагрузки на крюке при движении бурильного инструмента вверх

$$T1 = G1 – (G1 + G2) / 2.$$

Сила сопротивления по мере углубления скважины постоянно увеличивается с увеличением веса бурильного инструмента и, по большому счету, если факторы технологических условий бурения остаются на определенном участке без изменений, то удельная сила сопротивления на 100 м ствола скважины должна оставаться без значительных изменений. В случае возникновения вышеупомянутыхтехнологических факторов, влияющих на увеличение коэффициента сопротивления, удельная сила сопротивления зарегистрируется аномалией, на которую следует обратить внимание для осуществления соответствующих технологических мероприятий. Поэтому для более качественной оценки текущих сил сопротивления при бурении скважины определяем удельную силу сопротивления T1уд (т/100 м) движению бурильного инструмента в скважине по формуле

$$T1уд = [G1 – (G1 + G2) / 2] / 100. \quad (1)$$

Апробация данной методики определения сил сопротивления бурильной колонны осуществлена на нефтяном месторождении Среднего Приобья.

Ниже, в таблице 1, приведены результаты замеров нагрузок на крюке и расчетных удельных сил сопротивления на скв № 6919 куста 548. (Глубина скважины – 3262 м. Отход – 1175 м. Профиль В. Максимальный угол – 35 градусов)

Для получения расчетных параметров сил сопротивления по мере углубления скважины останавливалисьбуровые насосы после полного захода квадрата в ротор и при подъеме бурильной колонны до 10–12 метров от забоя регистрировался вес на крюке G1. Затем, при плавном спуске бурильной колонны до забоя, снова регистрировался вес на крюке G2 и производилось наращивание бурильного инструмента с продолжением дальнейшего бурения. На основании полученных средних значений веса на крюке G1 и G2 по формуле 1 определялись расчетные значения сил сопротивления T1 и T1уд и заносились в таблицу 1.

Из таблицы видно, что удельный коэффициент сопротивления изменялся в зависимости отсопутствующих независимых факторов (перегибы ствола скважины) и технологических мероприятий (ввод смазочной добавки). При забое 2325 метров удельная сила сопротивления достигла значения 0,58 т / 100 м. Для её возможного снижения было принято решение по дополнительной обработке бурового раствора смазочной добавкой. В результате удельная сила сопротивления вначале снизилась до значений 0,31 т / 100 м, затем постепенно поднялась до прежнего значения.

Таблица 1 – Результаты промысловых исследований на скважине № 6919 куста 548

Забой, м	Нагрузка на крюке G1 (т)	Нагрузка на крюке G2 (т)	Сила сопротивления Т1(т)	Удельная сила сопротивления Т1уд (т / 100 м)	Технологические факторы и мероприятия
1	2	3	4	5	6
2325	66,10	38,95	13,58	0,58	Ввод смазочной добавки
2349	55,20	40,90	7,15	0,31	–
2375	66,30	40,50	12,90	0,54	–
2425	67,95	41,05	13,45	0,55	–
2499	68,89	41,00	13,95	0,56	–
2522	70,97	41,72	14,63	0,58	–
2597	72,18	41,86	15,16	0,58	–
2696	74,92	42,14	16,85	0,63	Снижение угла
2745	76,42	42,88	16,77	0,61	–
2844	80,00	43,19	18,41	0,65	–
3189	97,09	43,45	26,82	0,84	Интенсивный ввод смазочной добавки
3241	96,43	43,94	26,25	0,81	–
3262	86,53	45,20	20,67	0,63	Промывка
3262	84,44	44,65	19,90	0,60	–

Однако в дальнейшем резко увеличилась до значения 0,84 т / 100 м. Это объясняется фактором резкого снижения зенитного угла ствола скважины с 26 градусов до 0. При данном значении силы сопротивления начались его затяжки и посадкибурильного инструмента в процессе его наращивания. Технологами на буровой было принято решение в процессе бурения дополнительно обработать раствор смазочной добавкой и по окончании бурения скважину качественно промыть. При этом при промывке ввод смазки в буровой раствор не прекращался. В результате удельнаясила сопротивления снизилась до значения 0,60 т / 100 м – близкого к первоначальному, при забое 2325 м. Подъем бурильного инструмента под каротажные работы прошел успешно, без затяжек, с кратковременными промежуточными промывками согласно технологическому регламенту.

Ниже, в таблице 2, приведены результаты замеров нагрузок на крюке и расчетных удельных сил сопротивления на скв № 3980 куста 553. (Глубина скважины – 3090 м. Смещение – 759 м. Профиль В. Максимальный угол – 26 градусов)

Таблица 2 – Результаты промысловых исследований на скважине № 3980 куста 553

Забой, м	Нагрузка на крюке G1 (т)	Нагрузка на крюке G2 (т)	Сила сопротивления Т1 (т)	Удельная сила сопротивления Т1уд (т / 100 м)	Технологические факторы и мероприятия
1	2	3	4	5	6
800	25,5	22,2	1,65	0,21	Рост угла
904	28,24	23,45	2,40	0,26	–
1000	30,30	25,70	2,30	0,23	–
1096	33,95	27,31	3,32	0,30	–
1198	35,80	29,21	3,30	0,28	Стабилизация угла
1290	37,27	30,56	3,36	0,26	–
1395	39,19	33,12	3,04	0,22	–
1499	41,80	33,86	3,97	0,26	–
1600	44,73	36,88	3,93	0,25	–
1692	46,29	37,08	4,61	0,27	–
1790	47,89	38,21	4,84	0,27	–
1914	51,01	42,28	4,37	0,23	–
2013	53,50	43,19	5,16	0,25	–
2285	59,80	47,64	6,08	0,26	Снижение максимального угла
2384	62,00	42,00	10,00	0,41	–
2505	66,12	43,04	11,54	0,46	–
2781	73,80	46,61	13,60	0,49	–
2879	79,59	49,21	15,19	0,53	Снижение угла до 0
3046	86,00	51,00	17,50	0,57	Ввод смазки
3090	87,50	51,80	17,85	0,58	–
3090	83,39	51,87	15,76	0,51	Промывка

Из данной таблицы видно, что прослеживается подобная тенденция изменения удельных сил сопротивления из-за технологических факторов, связанных с резким изменением кривизны ствола скважины, и мероприятий по вводу смазывающей добавки в буровой раствор. При этом после ввода смазывающей добавки при снижении удельной силы сопротивления с 0,58 до 0,51 т / 100 м закончили бурение скважины и приступили к успешному подъему бурильного инструмента. Следует обратить внимание, что на второй скважине, с меньшим максимальным углом, удельная сила сопротивления на 0,09 т / 100 меньше, чем на первой скважине. Это соответствует теоретическим исследованиям [1] о влиянии прижимающей силы, зависящей главным образом от максимального угла наклона скважины. Однако могут быть и другие факторы, не учтенные в статье. Поэтомув будущемпотребуется глубокий статистический анализ зависимости удельных сил сопротивления от профиля наклонно-направленных скважин, количества и типа введенной смазывающей добавкии других факторов.

Кроме того, рекомендуется для автоматизированного определения расчетных значений удельных сил сопротивления привязать формулу (1) через программное обеспечение к станции контроля параметров режима бурения ГТИ, имеющейся на буровых.

Таким образом, автоматизированные показания значений удельных сил сопротивлений в реальном времени позволят оперативно улучшать смазочную способность бурового раствора, оптимизировать текущий профиль ствола скважины, снижать интенсивность его искривления и устранить влияние других выявленных факторов. В результате данное направление в технологии строительства наклонно-направленных скважин обеспечит снижение их осложнений в процессе бурения и дальнейшее повышение скоростей бурения.

Удаления продуктов разрушения, имеющее весьма существенное значение при бурении скважин алмазными коронками, может осуществляться промывочной жидкости или воздухом. Условия, в которых протекает этот процесс, более сложные, чем при работе породоразрущающим инструментом других типов. Это связано с небольшим зазором между коронкой, поверхностью забоя и стенками скважины, способностью шлама некоторых пород спрессовываться в плотную массу, возможностью преждевременного выхода из строя дорогостоящих алмазных зерен (резцов) и др. Поэтому промывочная жидкость должна быть хорошо подвижно, обладать высокой теплопроводностью и теплоемкостью, антифрикционными свойсвами и способностью гасить вибрации.

На эффективность работы коронки существенно влияют состав промывочной жидкости и концентрация добавляемых веществ при ее обработке. Причем для разных пород эти показатели имеют вполне определен

Литература:

1. Александров М.М. Определение сил сопротивления при бурении скважин. – М. : Недра, 1965.
2. Бронзов А.С., Васильев Ю.С. Турбинное бурение наклонных скважин. – М. : Недра, 1965.
3. Муллагалиев Р.Т. Расчет нагрузки на крюке при бурении наклонных скважин // Труды Тюменского индустриального института. Технология бурения скважин. – Тюмень, 1972. – № 13.
4. Справочник инженера по бурению. 2-й том / Под редакцией Мищевича В.И. и Сидорова Н.А. – М. : Недра, 1973.

References:

1. Aleksandrov M.M. Determination of resistance forces when drilling wells. – M. : Nedra, 1965.
2. Bronzov A.S., Vasiliev Y.S. Turbine drilling of inclined wells. – M. : Nedra, 1965.
3. Mullagaliev R.T. Calculation of hook load at drilling of directional wells // Proc. of Tyumen Industrial Institute. Technology of drilling wells. – Tyumen, 1972. – № 13.
4. Handbook of Drilling Engineer. 2nd volume / Under edition of Mishchevich V.I. and Sidorov N.A – M. : Nedra, 1973.