

Реагент	Ectablock			Разжижитель			Графит			Сода кальцинированная			Пентоксил - С		
	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6
Концентрация, %	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6
Масса ползуна, кг	0,150			0,122			0,152			0,172			0,168		
Козф. трения	0,65	0,63	0,61	0,76	0,68	0,65	0,60	0,58	0,56	0,57	0,56	0,51	0,52	0,52	0,54
Эл.пров.	0,0029	0,0035	0,0041	0,0041	0,0070	0,0117	0,0025	0,0023	0,0022	0,0045	0,0061	0,0094	0,0022	0,0025	0,0026

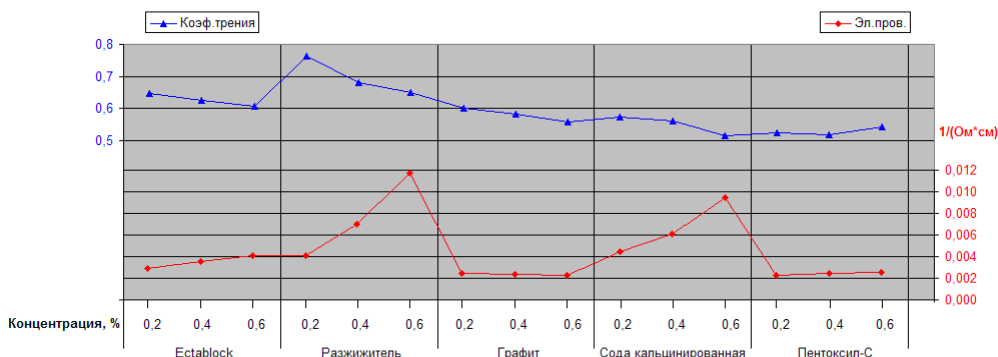


Рис.4. Зависимость удельной электропроводности растворов и коэффициента трения между образцами горной породы от концентрации реагента

#### Литература

1. Евсеев В.Д. Электропроводность неорганического диэлектрика и жидкости – основа эффекта П.А. Ребиндера// Инженер-нефтяник, 2013. – №2. – С. 52-57.
2. Лесин В.С., Рычков Е.И. Исследование трения в анизотропных горных породах// Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 115-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова. Том II; Томский политехнический университет.–Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. –С. 346-348.
3. Евсеев В.Д. Природа эффекта Ребиндера при разрушении неорганических диэлектриков и электрокогезионные явления // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Физика, 1985. – № 2. – С.29-35.
4. Дерягин Б.В. Что такое трение? Издание 2-е, перераб и доп. М.: Изд-во Академии наук СССР. – 228 с.
5. Тимошенко С., Юнг Д. Инженерная механика. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. – 500 с.

### АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ САПР С ЦЕЛЬЮ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ В СКВАЖИНЕ

В.В. Ли

Научный руководитель старший преподаватель А.В. Епихин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Бурильная колонна представляет собой подвешенную систему последовательно соединенных труб значительной длины, находящихся в состоянии вращения и поступательного движения. Важной особенностью работы бурильной колонны является то, что под действием разнонаправленных нагрузок колонна в процессе работы теряет устойчивость прямолинейной формы равновесия [1].

Стоит отметить, что при бурении турбинным способом бурильная колонна испытывает значительно меньшие нагрузки, чем при роторном способе, в связи с ее неподвижностью. Но даже при небольшом искривлении скважины бурильная колонна располагается на лежачей стенке и воспринимает реактивный момент работы турбобура в своей нижней части. Реактивный момент затухает по мере удаления от турбобура и трения о стенки скважины, поэтому можно считать, что бурильная колонна практически разгружена от действия вращающего момента, что позволяет свести расчет бурильной колонны только с учетом веса турбобура, утяжеленных бурильных труб (УБТ) и давления промывочной жидкости. При турбинном бурении вследствие неподвижности бурильной колонны отсутствуют переменные напряжения изгиба, которые обычно являются причиной усталостных поломок труб и замков в роторном бурении [2].

В отличие от турбинного бурения, при бурении ротором присутствует крутящий момент, который оказывает огромные динамические нагрузки на колонну. При этом способе с увеличением глубины скважины возрастают потери мощности на холостое вращение и крутящий момент, необходимый для вращения колонны [2].

С началом бурения бурильная колонна на всей длине находится в сжатом состоянии, благодаря тому, что своей распределенной по оси массой и системой подачи бурового станка создает осевую нагрузку на породоразрушающий инструмент, стремящуюся к величине, требуемой для разрушения горной породы на забое. После того, как масса колонны, по мере углубления скважины, достигнет (превысит) величины этой

необходимой осевой нагрузки, в колонне появляется так называемая нулевая зона. Нулевой зоной называют сечение, в котором сжатие переходит в растяжение, так как избыточная масса колонны с этого момента поддерживается во взвешенном состоянии за счет частично разгрузки на талевую систему [3].

Следовательно, при бурении на колонну труб действуют целый комплекс постоянных (статических), переменных (динамических) нагрузок, нагрузки связанные с давлением промывочной жидкости, перепады давлений до 25 Мпа, температуры до 200 градусов Цельсия, а также агрессивные среды, обеспечиваемые рецептурой выбранного раствора, применяемым химическими реагентами и содержащим флюидонасыщенных пластов. Характер нагрузок на бурильную колонну изменяется по глубине: в призабойной зоне преобладают переменные нагрузки, вблизи устья – статические [3].

Максимальные постоянные (статические) нагрузки – растяжение и кручение – действуют в верхней части колонны у устья скважины. В случае прихвата бурового снаряда значительный крутящий момент может возникнуть и в нижней призабойной зоне колонны бурильных труб. Так сопротивление долоту со стороны разрушаемой на забое породы может преодолеваться не только крутящим моментом ротора, но и благодаря кинетической энергии самой бурильной колонны. При остановке работы долота происходит трансформация кинетической энергии колонны в потенциальную энергию закрученной пружины, что при критическом значении, достаточном для расклинивания долота, высвобождается и обратно трансформируется в кинетическую энергию, что вызывает колебательные напряжения [4].

Иными словами бурильная колонна закручивается словно пружина, и расслабляется, расклинивая долото, создавая значительный крутящий момент в призабойной зоне, который также называется инерционным эффектом. Эти нагрузки значительны по величине, и в случае несвоевременной отбраковки бурильных труб, достигших предельного состояния по износу, могут привести к их мгновенной поломке. Такие поломки возможны и при использовании новых бурильных труб, если по своей прочностной характеристике они не соответствует мощности буровой установки. Инерционный эффект вала турбобура в турбинном бурении незначительный, так что бурильная колонна находится в более благоприятных рабочих условиях. Это отражает и статистика бурения скважин: при роторном бурении замки, бурильные трубы и обсадные колонны изнашиваются в значительно большей степени, чем при турбинном [4].

Не менее опасны статические нагрузки изгиба для любого участка бурильной колонны, но в особенности на участках скважины, приуроченных к большим кавернам значительной протяженности. Об этом свидетельствует многочисленные случаи появления в колонне сильно искривлённых труб (до 1,5-3,0 мм/м при допуске на кривизну до 1,0 мм/м), выявляемых визуально без проведения специальных измерений кривизны. Статические нагрузки значительны по величине, но кратковременны по действию, поэтому сравнительно легко прогнозируемы и поломки под действием этих нагрузок могут быть своевременно предупреждены [4].

Наибольшую опасность для колонны бурильных труб представляют нагрузки переменного характера, которые по своей величине в 4-5 раз меньше статических, но они постоянно меняют знак нагрузки: растяжение (знак «+»), сжатие (знак «-»), создавая условия незаметного усталостного разрушения труб, действующие практически непрерывно. Кроме того, они трудно прогнозируемы, и своевременное предупреждение их проблематично [4].

На бурильную колонну действуют также динамические нагрузки, возникающие в результате крутильных, продольных и поперечных колебаний. При резонансных явлениях эти нагрузки могут привести к разрушению бурильной колонны, но при нормальных режимах бурения они незначительны, то есть не оказывают существенного влияния на прочность колонны, поэтому в расчетах не учитываются [5].

Давление очистного агента в геологоразведочном бурении обычно не превышает 6,0 МПа и не опасно с точки зрения прочности колонны труб, но может приводить к значительным утечкам через их резьбовые соединения. Утечки возможны только в случаях, когда резьбы не затянуты с заданным крутящим моментом или нарушена плотность их стыка из-за перекоса упорных торца муфты и (или) уступа ниппеля (брак изготовителя), а также в результате попадания на их поверхность частиц шлама в процессе сборки (нарушение правил эксплуатации) [5]. Если утечка начала происходить, то это за несколько часов в бурильной колонне может быть промыта каверна такой величины, при которой произойдет обрыв бурильных труб.

В свою очередь, при бурении нефтяных и газовых скважин, давление бурового раствора кратно превышает показатели геологоразведочного бурения, и к возможности промыва бурильной колонны добавляется опасность ее разрыва избыточным давлением очистного агента. Важно учитывать и агрессивное воздействие реагентов бурового раствора на конструкционную целостность бурильной колонны. Особенно это актуально при применении буровых растворов со значительным отклонением pH от нейтральной среды и в случае ликвидации аварий с применением кислотных ванн.

Учитывая комплекс нагрузок и характер их воздействия на бурильную колонну при сооружении скважин, увеличение средней глубины скважин, усложнение их траекторий, можно сделать вывод, проблема контроля устойчивости и целостности бурового оборудования, в том числе бурильной колонны, становится все более актуальной. Одним из вариантов предупреждения аварий с бурильной колонной является трехмерное моделирование ее работы с учетом действующих нагрузок. Для этих целей особенно удобно использовать системы автоматизированного проектирования (САПР). Для использования с целью поставленных задач они должны отвечать следующим требованиям: возможность трехмерного моделирования, наличие расчетов нагруженного состояния тела (статические и динамические нагрузки), возможность оценки состояния тела в среде, с учетом ее свойств и состава (под средой в данном контексте понимается буровой раствор).

С этой целью была сделана подборка следующих систем САПР и проведено их сравнение по ряду параметров. Результаты исследования приведены в табл.1. При анализе рынка систем САПР производился

визуальный анализ, который позволил из 50 наименований систем выбрать 24, которые по тем или иным параметрам подходят для целей проектирования бурильных колонн. Следует отметить, что было сделано допущение: сравнение производилось не по характеристикам и результатам работы каждого наименования системы САПР, а на основании предварительного изучения возможностей указанных систем согласно данным информационных порталов и отзывам пользователей. Вполне возможно, что функционал частично не был принят во внимание.

Согласно проведенному анализу было выбрано 5 систем САПР, которые могут потенциально справиться с указанной задачей: Ansys, Лира-САПР, Open-FOAM и SolidWorks. В дальнейшем будут проведены исследования по алгоритму: проектирование 3D модели участка бурильной колонны, расчет нагрузок действующих на нее, оценка возможности ее работы в реальных условиях буровой. В случае если программное обеспечение позволит производить комплексное моделирование эксперимента, то оно будет использовано в дальнейшем. Не исключается, что некоторые системы будут использоваться исключительно для отдельных целей – расчет, например, на статику или динамику. Это обусловлено тем, что процесс бурения – многофакторный и оптимальным является проведение эксперимента от элементарного к комплексному. Это позволит снизить вероятность ошибки и детально разобраться в особенностях моделирования бурильной колонны, как единой системы.

Таблица 1

Сравнительный анализ систем САПР с позиции использования при проектировании работы бурильной колонны

Система	3D моделирование	Расчет механики		Расчет гидравлики	Учет воздействия среды	Моделирование движения
		статика	динамика			
<b>Ansys</b>	+	+	+	+	+	+
<b>Лира-САПР</b>	+	+	+	+	+	+
ELCUT	-	+	-	-	-	-
<b>CalculiX</b>	+	+	+	+	-	+
<b>OpenFOAM</b>	+	+	+	+	+	+
freeCAD	+	-	-	-	-	+
FreeCAD (Juergen Riegel's)	+	+	+	-	-	+
SALOME	+	+	-	-	-	-
ADEM	+	-	-	-	-	-
AutoCAD	+	+	+	-	-	+
Autodesk Inventor	+	-	-	-	-	+
Ironcad	+	-	-	-	-	-
Ironcad Draft	+	-	-	-	-	-
MEDUSA4	+	-	-	-	-	-
Mineframe*	+	-	-	-	-	-
NX (система автоматизированного проектирования)	+	+	+	-	-	+
Rhinoceros 3D	+	-	-	-	-	-
SAMCEF	+	+	+	-	-	-
Solid Edge	+	+	+	-	-	-
Компас	+	-	-	-	-	-
<b>SolidWorks</b>	+	+	+	+	-	+
T-FLEX CAD	+	-	-	-	-	-
Tecnomatix	+	+	+	-	-	+
TurboCAD	+	-	-	-	-	-

Процесс бурения капиталоемко и в отношении колонны бурильных труб нет возможности планировать, проводить эксперименты в реальных масштабах и с заданной повторяемостью. Поэтому использование компьютерного 3D-моделирования и инженерных расчетов позволило бы повысить эффективность проектирования колонн бурильных труб, предупредить возможные аварии и осложнения и повысить эффективность проектирования скважин.

#### Литература

1. Булатов, Анатолий Иванович. Справочник инженера по бурению : в 4 кн. / А. И. Булатов, А. Г. Аветисов. — Москва: Недра, 1985. — 414 с.
2. Технология бурения нефтяных и газовых скважин : учебник для вузов / А. Н. Попов [и др.]; под ред. А. И. Спивака. — Москва: Недра, 2003. — 509 с.:
3. Сароян, Александр Ервандович. Бурильные колонны в глубоком бурении / А. Е. Сароян. — Москва: Недра, 1979. — 231 с.

4. Сароян, Александр Ервандович. Теория и практика работы бурильной колонны / А. Е. Сароян. — Москва: Недра, 1990. — 263 с.
5. А.с. – 56838 KZ. Колонна бурильных труб/ А. Мусанов, А. Шалбай; Оpubл. 2008

### ОСОБЕННОСТИ СТАТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИНЫ

Ли Сяо

Научный руководитель профессор Ю.Л. Боярко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г.Томск, Россия

Различают два вида фильтрации: статическая, происходящая при остановках циркуляции промывочной жидкостив скважине; динамическая – в условиях циркуляции. В условиях статической фильтрации, когда промывочная жидкость неподвижна, скорость фильтрации снижается, а толщина фильтрационной корки увеличивается со скоростью, затухающей во времени. Таким образом, через какой-то определённый промежуток времени скорость статической фильтрации вполне может стать равной нулю. В условиях динамической фильтрации рост фильтрационной корки ограничен эрозионным воздействием восходящего потока промывочной жидкости.[1].В момент вскрытия пласта бурением скорость фильтрации высока и фильтрационная корка быстро растёт. После того как скорость роста корки становится равной скорости её эрозии, толщина фильтрационной корки и скорость фильтрации сохраняются постоянными.

Теория статической фильтрации

Если единичный объём устойчивой суспензии твёрдого вещества фильтруется через проницаемый фильтр и если объёмную долю фильтрата обозначить через  $\alpha$ , то объёмная доля корки, отложившейся на фильтре и содержащей твёрдую и жидкую фазы, составит  $(1-\alpha)$ . [3] Поэтому, если  $V_K$  – объём корки, а  $V_\Phi$  – объём фильтрата, то

$$\frac{V_K}{V_\Phi} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (1)$$

А толщина корки  $h$ , образующейся на единичной поверхности в единицу времени

$$h = V_\Phi \cdot \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (2)$$

По закону Дарси[1]:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{k \cdot \Delta P}{\mu \cdot h} \quad (3)$$

где  $k$  – проницаемость, [Д];

$\Delta P$  – перепад давления, [кгс/см<sup>2</sup>];

$\mu$  – вязкость фильтрата, [сП];

$h$  – толщина, [см];

$v$  – объём фильтрата, [см<sup>3</sup>];

$t$  – время, [с].

Следовательно,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{k \cdot \Delta P}{\mu \cdot V_\Phi} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

После интегрирования получим:

$$V_\Phi^2 = \frac{2k \cdot \Delta P}{\mu} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot t \quad (4)$$

Из уравнений (1) и (4) имеем:

$$V_\Phi^2 = \frac{2k \cdot \Delta P}{\mu} \cdot \frac{V_\Phi}{V_K} \quad (5)$$

Если площадь фильтрационной корки равна  $A$ ,

$$V_\Phi^2 = \frac{2k \cdot \Delta P \cdot A^2}{\mu} \cdot \frac{V_\Phi}{V_K} \cdot t \quad (6)$$

Это фундаментальное уравнение, определяющее фильтрацию при статических условиях.

Зависимость объёма фильтрата от времени

Установили, что при фильтрации бурового раствора через бумагу в условиях постоянных температуры и давления  $V_\Phi$  пропорционален  $t^{0.5}$ , если пренебречь небольшой ошибкой при значениях, близких к нулю. Отсюда следует, что для данного бурового раствора отношение  $V_\Phi/V_K$  и проницаемость  $k$  в уравнении (6) от времени не зависят. Хотя этот вывод и не может быть распространён на все буровые растворы, он вполне приемлем для практических целей и может служить основой для объяснения механизма статической фильтрации.

Эксперименты показали, что для определенного давления уравнение (6) можно представить в следующем виде:

$$V_\Phi - q_0 = A \cdot \sqrt{C \cdot t} \quad (7)$$

где  $q_0$  – ошибка при значениях, близких к нулю ( мгновенная фильтрация бурового раствора );

$C$  – константа.

Таким образом, фильтрационные свойства различных буровых растворов можно оценить по суммарному объёму фильтрата за определенное время при стандартных условиях. Следующие условия рекомендованы для проведения лабораторных работ: продолжительность измерений 30 мин при давлении 0,7 МПа на поверхности образующейся корки примерно 45 см<sup>2</sup>[2].

Объём фильтрата за 30 мин можно оценить по объёму  $V_\Phi$  за время  $t_1$  из следующего уравнения: