

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ РЕЗЬБЫ НА ЗАВИСИМОСТЬ МОМЕНТА ЗАТЯЖКИ ОТ УГЛА ПОВОРОТА

Иванов В.А.<sup>1</sup>, Халтурин О.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, oleg-x@pstu.ru

Данная работа посвящена анализу влияния различных отклонений параметров резьбы на взаимозависимость момента затяжки замковой резьбы и угла поворота. Данный анализ необходим для повышения эффективности внедряемых автоматизированных ключей в деле их использования для оценки качества получаемого соединения. Оценка проводилась при помощи численного моделирования нескольких образцов резьбы 3-122 в пакете ANSYS. По результатам моделирования НДС получены зависимости момента затяжки от угла поворота. Результаты показали сложное влияние сочетаний различных отклонений параметров профиля и могут быть использованы для оценки процесса свинчивания. Дополнительный параметр контроля процесса свинчивания – угол поворота имеет второстепенное значение и может использоваться в качестве нормированного параметра только с учётом фактических размеров резьбы изделия.

Ключевые слова: напряжённо-деформированное состояние, конечно-элементное моделирование, коническая замковая резьба, момент затяжки.

## ANALYSIS OF INFLUENCE OF DEVIATIONS OF GEOMETRY ON STRESS IN TOOL JOINTS

Ivanov V.A.<sup>1</sup>, Khalturin O.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Perm national research polytechnic university, Russia, Perm, 614990, Komsomolsky Av. 29, oleg-x@pstu.ru

This paper analyzes the influence of various parameters deviations of thread on interdependence make-up torque and rotation angle in tool joints. This analysis is necessary to improve the effectiveness being implemented automated wrenches in their use to assess quality of produced join. Assessment is carried using the finite-element modeling of several samples of the tool joint with thread NC 46 using a ANSYS package. The results of the stress-strain state simulation obtained torque depending on the rotation angle. The results showed a complex effect of various combinations of deviations in profile parameters and can be used to evaluate the process of tool joints makeup. Additional make-up process control parameter - the rotation angle is of secondary importance and can be used as a normalized parameter considering only the actual dimensions of the part thread.

Keywords: stress-strain state, finite element modeling, tool joints, make-up torque.

Для соединения бурильных труб в колонны исторически применяются замковые резьбовые соединения (ЗРС) – конические резьбы с треугольным профилем и упорными торцами. Работоспособность бурильной колонны зависит напрямую от правильного выбора размеров резьбы по условию равнопрочности и оптимальной затяжке резьбы [8]. Оптимальный момент затяжки позволяет равномерно распределить нагрузки между ниппелем и муфтой, снизить размахи напряжений в опасном сечении при циклических нагрузках [4].

В связи с этим производителями компонентов бурильной колонны приводятся данные по оптимальному моменту для каждого типоразмера изделия. Однако, при практическом использовании бурильных труб отмечается недостаточность нормирования только одного параметра – момента свинчивания для контроля качества затяжки [5]. Другим параметром

доступным для контроля во время свинчивания является угол поворота присоединяемой детали. Для его контроля уже выпускаются ключи с автоматизированным считыванием показателей [9], позволяющим контролировать качество соединения по взаимоотношениям усилия и угла поворота [3]. Так, в инструкциях по сборке труб ОАО «Трубная металлургическая компания» приводятся эталонные диаграммы «момент-угол поворота» и рекомендации по анализу процесса сборки по взаимному расположению характерных точек перегиба диаграммы [6].

Из-за различных факторов, влияющих на функциональную связь момента и угла затяжки, такие диаграммы позволяют использовать угол поворота только лишь для качественной оценки процесса свинчивания. Одним из таких факторов является точность изготовления. Отклонения параметров резьбы приводят к перераспределению напряжений в телах деталей, а также на их контактных поверхностях.

Целью данной работы является оценить степень влияния фактических параметров профиля резьбы на взаимосвязь момента и угла затяжки. В настоящее время при нарезании резьб резцами, состоящими из точно выполненных державок и полнопрофильных пластин, основными параметрами профиля, зависящими от наладки станка, являются шаг резьбы, конусность и диаметры. При этом для контроля изделий на предприятиях-изготовителях используются резьбовые калибры, не дающие возможность дифференцированного контроля. Одновременно с этим у потребителей встаёт вопрос о комплектовании буровых колон, с надёжными резьбовыми соединениями.

### **Материалы и методы исследования**

Для оценки зависимости момента затяжки от угла поворота с учётом отклонений параметров резьбы, в системе ANSYS была создана конечно-элементная модель резьбового соединения. Плоская (осесимметричная) модель создана вырезанием из твёрдотельной CAD-модели ЗРС диаметрами 71x159 и резьбой 3-122 [1], в которой был заранее задан угол поворота муфты относительно ниппеля (рис.1,а). Шаг сетки в зоне контакта был задан 0,333 мм, а общее количество элементов составило около 40000. Для учёта возможности возникновения в местах концентрации напряжений превышающих предел текучести, была задана билинейная с кинематическим упрочнением модель материала в соответствии механическими свойствами стали 40ХНМА.

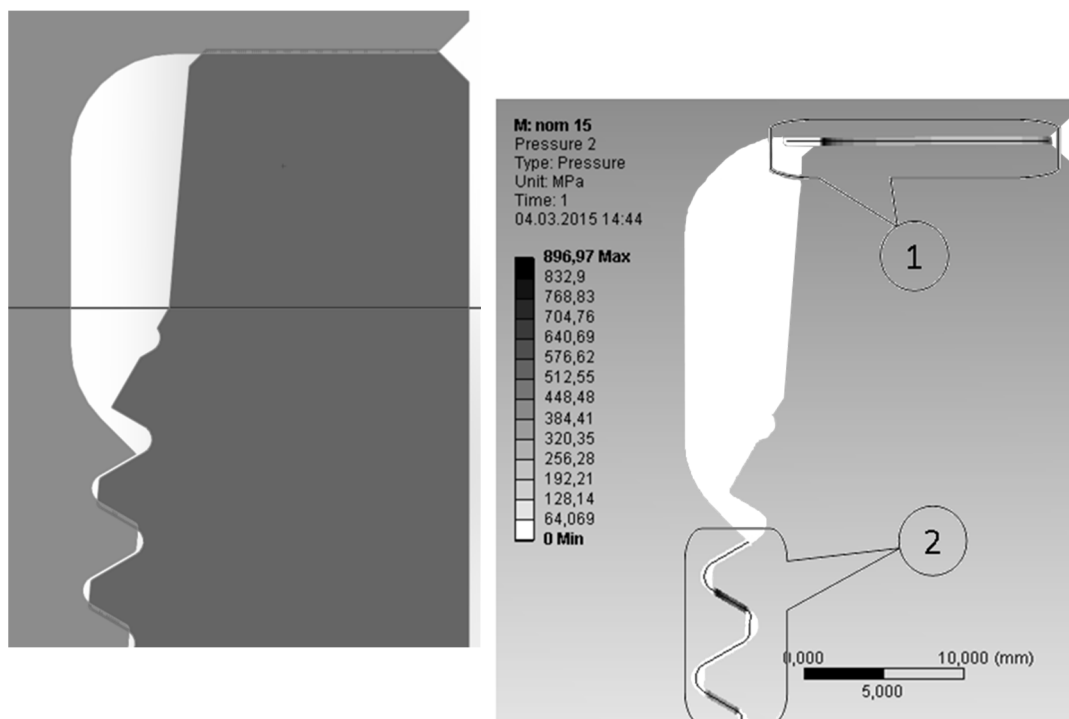


Рис. 1. Натяг в геометрической модели после поворота муфты на 15 градусов (а) и контактные давления вызванные натягом (б)

В ходе расчёта ANSYS компенсирует натяг и вводит поверхности контакта во взаимодействие в результате чего возникают контактные давления (рис.1,б) эквивалентные силам трения, преодолеваемым во время затяжки резьбы.

При интегрировании давлений в точках расчёта сетки КЭ (вдоль контура зоны контакта с последующей экстраполяцией по всей поверхности резьбового соединения были получены силы затяжки возникающие на торцах и в резьбовой части. Задаваясь средним коэффициентом трения резьбовых смазок  $\mu = 0,1$  и учитывая усилия потребные на подъём по винтовой линии были получены значения моментов свинчивания.

Для построения моделей выбирались несколько уровней отклонений конусности и шага (в скобках условное обозначение):

- номинальная конусность – нулевые отклонения (nom)
- середина поля допуска по ГОСТ Р 50864–96 – конусность ниппеля больше, а муфты меньше (spd)
- конусность ниппеля минимальна, а муфты максимальна (ff)
- номинальный шаг (dP0)
- максимальный шаг муфты и минимальный ниппеля (dP+)
- минимальный шаг муфты и максимальный ниппеля (dP-)

Диаметры изделий подбирались с учётом компенсации отклонений, так чтобы момент начала затяжки и момент смыкания торцов максимально совпадали, т.е. отсутствовал положительный или отрицательный натяг в соединении (таким образом представленные зависимости отображают последний участок диаграммы «момент-угол»).

### Результаты исследования и их обсуждение

Было построено несколько комплектов моделей с различными углами закручивания для различных сочетаний отклонений. По результатам каждого опыта были рассчитаны значения моментов затяжки  $M_z$  и его составляющие:  $M_T$  – момент от сил трения между упорными торцами и  $M_p$  – момент потребный на преодоление сил трения в резьбе и на подъём по виткам резьбы.

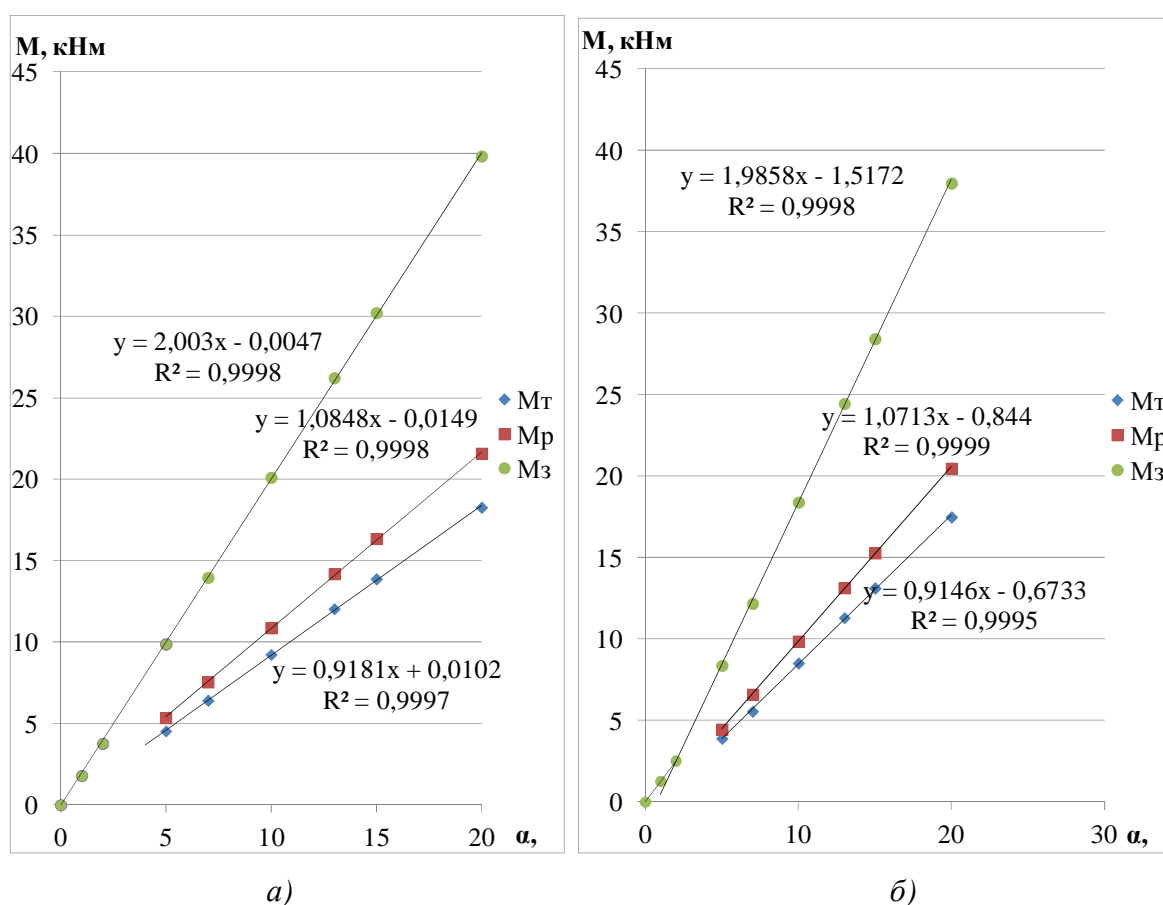


Рис. 2. Зависимости момента затяжки и его составляющих от угла поворота:

а) – для номинальной резьбы и б) – для резьбы, выполненной по середине поля допуска

График с зависимостями для номинальной резьбы (рис. 2.а) соответствует приводимой в литературе линейной зависимости [1]. В то время как неполный начальный контакт, возникающий в других моделях, приводит к появлению точек перегибов (рис. 2.б), поэтому, для унификации, все аппроксимации проводились по точкам с углами поворота от  $5^\circ$  до  $20^\circ$ .

При сравнении графиков на рис. 3 наблюдается гораздо большее влияние отклонения шага, чем конусности. Графики конусности после стабилизации площади контакта выглядят параллельными прямыми с незначительным смещением.

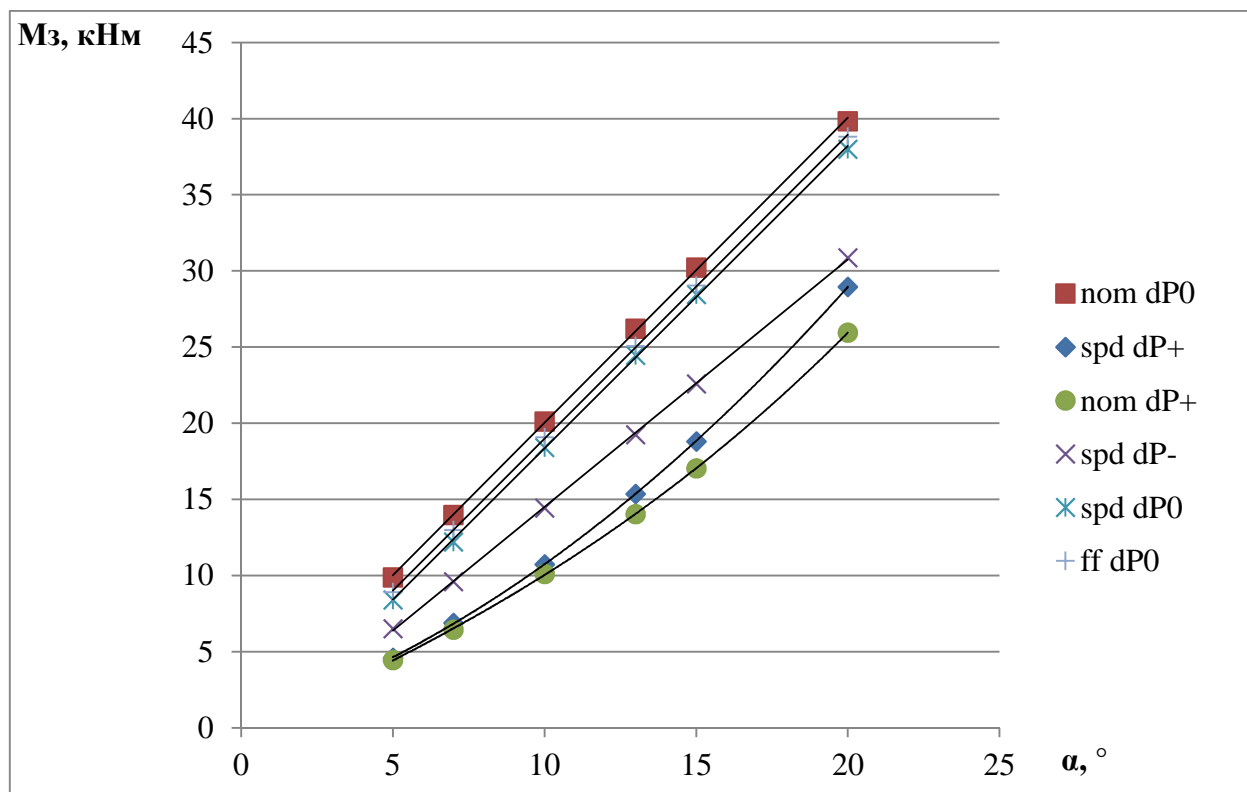


Рис. 3. Зависимости момента затяжки угла поворота для различных сочетаний отклонений

Введение погрешности шага по схеме «dP+», в виду уменьшения площади контакта, сильно сместило графики и придало им параболический вид. Несимметричное поле допуска на конусность уменьшает зависимость от погрешности шага («spd dP+») и, соответственно, требуемый для затяжки угол поворота. При противоположных погрешностях шага их влияние на момент затяжки не столь велико («spd dP-»), однако перезатяжка такого соединения и тем более экстремальное сочетание отклонений шага и конусности может привести к срезу резьбы – возникла пластическая деформация по всей толщине первого зуба модели ниппеля (рис. 4).

ОАО «Пермская компания нефтяного машиностроения», выпускающая УБТ данной конструкции из стали 40ХНМА, даёт для них рекомендацию по моменту свинчивания – 23,5 кНм [7]. Как видно из графика (рис. 2.а) этой величине момента будет соответствовать угол поворота ~ 13°. При этом развивается усилие затяжки, обеспечивающее герметичность и не раскрытие стыка, соответствующее моменту трения на торцах  $M_t \approx 11$  кН·м. Построим обратные зависимости требуемого угла поворота, от желаемого момента трения на торце.

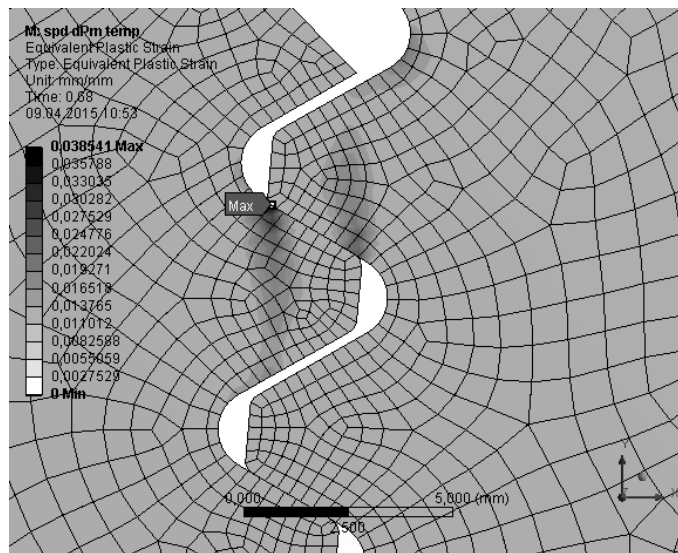


Рис. 4. Пластические деформации в модели «spd dP-» при угле поворота  $17^\circ$ , соответствующему моменту затяжки  $25,9 \text{ кН}\cdot\text{м}$

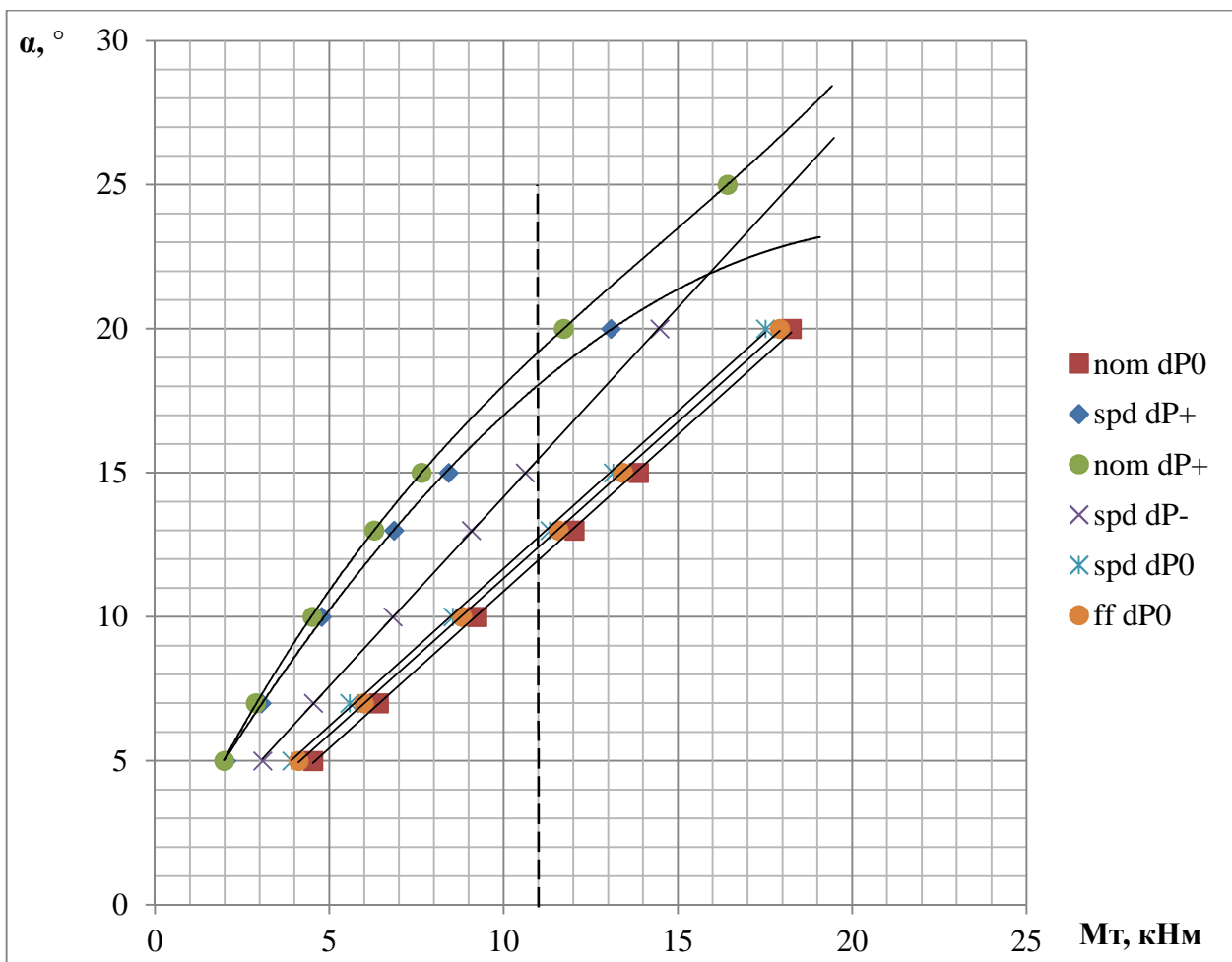


Рис. 5. Зависимости требуемого угла поворота от желаемого момента трения на торце для различных сочетаний отклонений

Разброс требуемого угла поворота при идеальном значении шага составляет всего  $12...13^\circ$  (рис. 5), тогда как появление погрешности шага увеличивает верхнюю границу до  $19^\circ$ . Используя полученные зависимости, рассчитаем моменты затяжки необходимые для

обеспечения одинакового усилия затяжки, соответствующего моменту трения на торцах  $M_t = 11 \text{ кНм}$  (при условии стабильности свойств резьбовой смазки и качества контактируемых поверхностей).

**Таблица**

| Схема отклонений             | nom dP0 | spd dP0 | ff dP0 | nom dP+ | spd dP+ | spd dP- |
|------------------------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| Угол поворота, °             | 11,97   | 11,28   | 12,42  | 19,23   | 18,05   | 15,48   |
| Момент затяжки, кНм          | 23,97   | 20,88   | 23,82  | 24,45   | 24,77   | 23,40   |
| отклонение от номинала,<br>% | 100,0%  | 87,1%   | 99,4%  | 102,0%  | 103,3%  | 97,6%   |

Данные таблицы показывают разброс значений момента затяжки в пределах ~ 3%, что значительно меньше разбросов значений углов поворота.

### **Выводы**

Использование диаграммы Момент-угол при сборке буровой колонны может помочь оценить качество получаемого соединения. Наличие отклонений конусности, находящихся в пределах допуска, вряд ли возможно будет оценить на реальной диаграмме, учитывая влияние других, не рассмотренных в данной работе факторов. Наличие прогиба на участке диаграммы после момента смыкания говорит о сочетании деталей с разноимёнными отклонениями шага. Сильное изменение угла наклона последнего участка диаграммы может говорить как о применении смазки с другим коэффициентом трения, так и о наличии нежелательных сочетаний фактических шагов резб муфты и ниппеля и их конусностей.

В виду большого разброса значений углов поворота для соединений с близкими свойствами, данный параметр контроля процесса свинчивания может иметь лишь второстепенное значение.

Таким образом, используя полученные данные, потребители бурового инструмента могут повысить качество собираемых буровых колонн.

### **Список литературы**

1. Барышников А.И. Повышение прочности и долговечности замковых резьбовых соединений буровой колонны : Дис. доктора технических наук. – М., 1998.
2. ГОСТ Р 50864–96 «Резьба коническая замковая для элементов буровых колонн».
3. Ибрагимов Н.Г., Афлетонов Р.А., Ганиев Р.Р., Макеев А.М., Низамутдинов Р.Ф. способ сборки герметичного резьбового соединения / Патент России № 2362082. 2009.
4. Кахадзе М.Ж. Циклическая прочность замковых резьбовых соединений утяжеленных буровых труб большого диаметра: Дис. кандидата технических наук. – М., 2007.

5. Песин М.В., Мокронос Е.Д., Макаров В.Ф., Мельников С.А. Технологические обеспечение надежности резьб утяжеленных бурильных труб // Новые материалы и технологии в машиностроении – 2011 : материалы XIV Международной научно-технической конференции / БТИТА. – Брянск, 2011.
6. РЭ ПС 02-003-2011: Руководство по эксплуатации обсадных труб с резьбовым соединением ТМК UP PF/ ООО «ТМК - Премиум Сервис» – М., 06.04.2015 – 36 с.
7. Утяжелённые ведущие и толстостенные бурильные трубы. Каталог, июнь 2012. – URL: <http://issuu.com/pknm/docs/production4> (дата обращения 05.03.2015).
8. Щербюк Н.Д. Резьбовые соединения труб нефтяного сортамента и забойных двигателей / Н. Д. Щербюк, Н. В. Якубовский. — М.: Недра, 1974. — 253 с.
9. Weatherford. Скважинное оборудование. URL: [http://www.weatherford.ru/ru/service/well\\_construction/trs/equipment#h2-5](http://www.weatherford.ru/ru/service/well_construction/trs/equipment#h2-5) (дата обращения 05.03.2015).

**Рецензенты:**

Беленький В.Я., д.т.н., профессор, декан МТФ ПНИПУ, г. Пермь;

Коротаев А.Ю., д.т.н., главный научный сотрудник ООО «ВНИИБТ – Буровой инструмент», г. Пермь.