

Конструкция резьбовых соединений для заканчивания горизонтальных скважин

С. А. РЕКИН, А. Р. НУРГАЛЕЕВ, С. А. ЯКУНИН – ООО «ТМК-Премиум Сервис»
А. Р. АГИШЕВ, В. В. СЛОБОДИН – ПАО «ТМК»

Продуктивные пласты современных разрабатываемых месторождений располагаются все глубже и во все более сложных геологических условиях. Для повышения нефтеотдачи пласта и сокращения общего количества скважин на проекте строятся горизонтальные скважины. Развитие технологии наклонно-направленного и горизонтального бурения привело не только к появлению нового бурового оборудования (роторно-управляемые системы, телеметрия и т.д.), но и разработке новых резьбовых соединений и подходов их расчета для выбора к проекту с учетом жесткости колонны на изгиб и контактных сил взаимодействия колонны со стенкой скважины.

Ключевые слова: ООО «ТМК-Премиум Сервис», резьбовое соединение ТМК UP Moment, ТМК UP Centum, эффективность на сжатие 100%, потеря продольной устойчивости, горизонтальные скважины, локальные изгибные напряжения в области муфты.

В виду того, что запасы «легкой» нефти и газа сокращаются, нефтегазовые компании все больше ведут освоение сложных месторождений. Это приводит к увеличению глубин бурения, бурению горизонтальных скважин и скважин с большим отходом от вертикали, разработке месторождений с аномально высокими пластовыми давлениями.

В 2013–2018 годах доля горизонтального бурения выросла с 21% до 48%, а объемы вертикального бурения снизились на 13%, и эта тенденция сохранится в ближайшем будущем, согласно данным отчета Deloitte. Все это приводит к повышению требований к внутрискважинному оборудованию.

При бурении и заканчивании горизонтальных скважин оборудование при спуске и эксплуатации воспринимает комбинированное нагружение. В связи с одновременным воздействием сжимающей нагрузки, нагрузки от изгиба, внутреннего и внешнего давления наиболее опасные сечения находятся в наклонно-направленном интервале (рис. 1).

Выделим критерии, которые влияют на величину эквивалентного напряжения:

- геометрические параметры скважины (внутренний диаметр обсаженного ствола, эффективный диаметр открытого ствола, радиальный зазор между колонной и стенкой скважины, коэффициент трения колонны о породу);
- осевые силы сопротивления перемещению колонны и вращению колонны;
- интенсивность искривления ствола скважины и изгибающий момент;
- вес колонны и влияние контактных сил.

Осевые силы сопротивления колонны возникают из-за осевого перемещения колонны вверх/вниз, как результат трения о стенку скважины. Преодоление этих сил вызывает в колонне:

- повышенные сжимающие усилия в процессе передачи осевой нагрузки нижней части колонны;
- изгибающие нагрузки при прохождении наклонно-направленных участков с большой интенсивностью искривления,
- высокий крутящий момент вращения колонны при спуске с вращением колонны.

Сопротивление движению колонны определяется значением коэффициента трения на данном участке скважины и контактными силами, возникающими между колонной и стенкой скважины (рис. 1) [1].



Рис. 1. Нагрузки, действующие на колонну в процессе спуска в наклонно-направленном интервале

Наиболее опасным следствием действия сжимающих нагрузок является локальная потеря продольной устойчивости сначала в форме плоской синусоиды – «синусоидальному баклингу», переходящей по мере увеличения сжимающей нагрузки к виду пространственной спирали – «спиральному баклингу» (рис. 2). Превышение сжимающих усилий сверх критических нагрузок «баклинга» сопровождается прогрессирующим ростом прижимающих усилий в контакте «колонна – стенки скважины», что приводит к заклинке (прихвату) колонны и инструмента в скважине. Наиболее часто «баклинг» наблюдается при бурении и спуске колонны без вращения. При операциях с вращением коэффициенты трения скольжения колонны переходят в коэффициенты трения качения, что позволяет снизить силы сопротивления перемещению колонны вдоль оси скважины, тем самым обеспечивая достижения проектной глубины спуска.

Установлено, что значение критической нагрузки, приводящей к «баклингу» в горизонтальном стволе, прямо зависит от распределенного веса труб в буровом растворе и изгибной жесткости сечения тела трубы [2].

В сжатом состоянии колонна испытывает как сжимающие нагрузки, так и изгибающие нагрузки, а в случае ее освобождения путем расхаживания с вращением при прихвате испытывает, дополнительно, высокие нагрузки при кручении. Действие комбинированных нагрузок «сжатие-изгиб» приводит к локальным изгибающим напряжениям в колонне, которые могут стать критическими для выбранного типоразмера трубы по слабому сечению [3].

Расчет изгибающих нагрузок требует определения локальных значений кривизны по телу трубы (BSM). Коэффициент BSM (Bending Stress Magnification – усиление напряжения изгиба) является отношением максимального абсолютного значения кривизны тела трубы к кривизне ствола скважины на заданном участке. Произведение расчетного значения BSM на напряжение изгиба σ_b определяет напряжения изгиба тела трубы $\sigma_b pipe$, которые концентрируются ближе к муфтовым соединениям при растяжении (см. рис. 3).

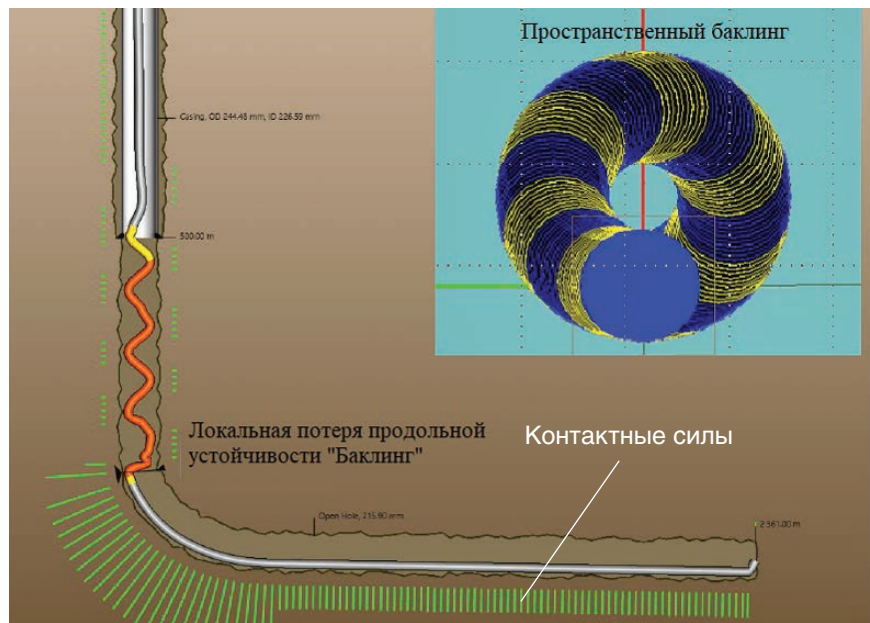


Рис. 2. Моделирование потери устойчивости колонны в Well Plan

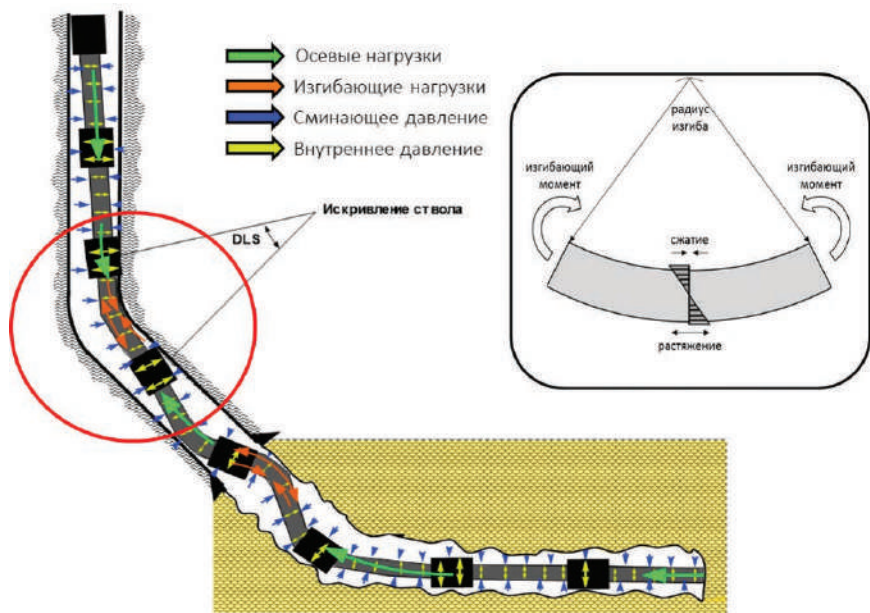


Рис. 3. Нагрузки, действующие на колонну в процессе ее эксплуатации

Полученные значения изгибающих напряжений используют в расчете эквивалентных напряжений по фон-Мизесу [2]. Условие прочности по соответствующей теории критерия прочности для напряженных состояний имеет следующий вид:

$$\sigma_{\text{Экв}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_a - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_a)^2]} < \frac{\sigma_{\text{тек}}}{n} \quad (1)$$

где:

$\sigma_{\text{Экв}}$ – эквивалентные напряжения по фон Мизесу

$$\sigma_a = \frac{Q_{\text{растяг}}}{F} + \sigma_b$$

$\sigma_b pipe$ – изгибающие напряжения, возникающие за счет кривизны скважины и учета жесткости тела трубы;

σ_θ – напряжения, действующие в тангенсальном (круговом) направлении;

σ_r – напряжения, действующие в радиальном направлении;

$\sigma_{\text{тек}}$ – предел текучести данного материала;

n – применяемый запас прочности.



Допустимые значения комбинированных нагрузок описываются эллипсом упругости с учетом локальных изгибающих напряжений (рис. 4).

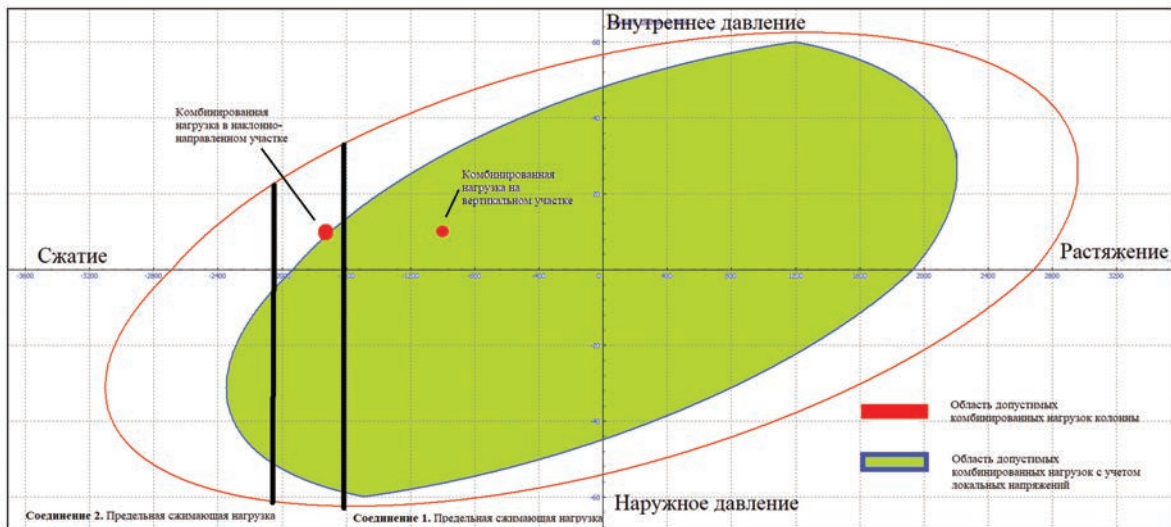


Рис. 4. ПРИМЕР. Область допустимых комбинированных нагрузок «осевая нагрузка-давление» для типоразмера 177,8x9,19 мм N80 TMK UP Centum

Одним из самых уязвимых элементов в обсадной колонне является резьбовое соединение, которое ограничено следующими техническими параметрами:

- эффективность на сжатие в сравнение с телом трубы;
- допустимый изгиб соединения;
- операционный момент.

Поэтому выбор соединения является важным критерием для сохранения целостности колонны и его работоспособности под действием комбинированных нагрузок (рис. 4 и рис. 5).

На рис. 4 показаны области допустимых нагрузок «осевая нагрузка-давление» для вертикального участка (случай отсутствия изгиба – выделено красной областью) и наклонно-направленного участка (случай с изгибом колонны – выделено зеленой областью) для типоразмера колонны 177,8x9,19 мм, группы прочности N80. Согласно результатам расчета, соединения с эффективностью на сжатие 60% и менее не способны обеспечить сохранение работоспособности соединения. Для рассмотренного случая требуется применение соединения с эффективностью на сжатие 100%, например, TMK UP Centum или TMK UP Moment.

На рис. 5 показаны области допустимых нагрузок «осевая нагрузка – крутящий момент» для вертикального и наклонно-направленного участка. В качестве сравнения выбраны два соединения: соединение №1 имеет 60% сжатия до предела текучести и операционным крутящим моментом 10 кН-м, соединение №2 имеет 100% сжатия до предела текучести и операционным крутящим моментом 16 кН-м. Расчет комбинированной нагрузки (рис. 4) для вертикального участка показал, что колонна сохраняет свою целостность и не превышает допустимые нагрузки для обоих соединений. Что касается наклонно-направленного участка

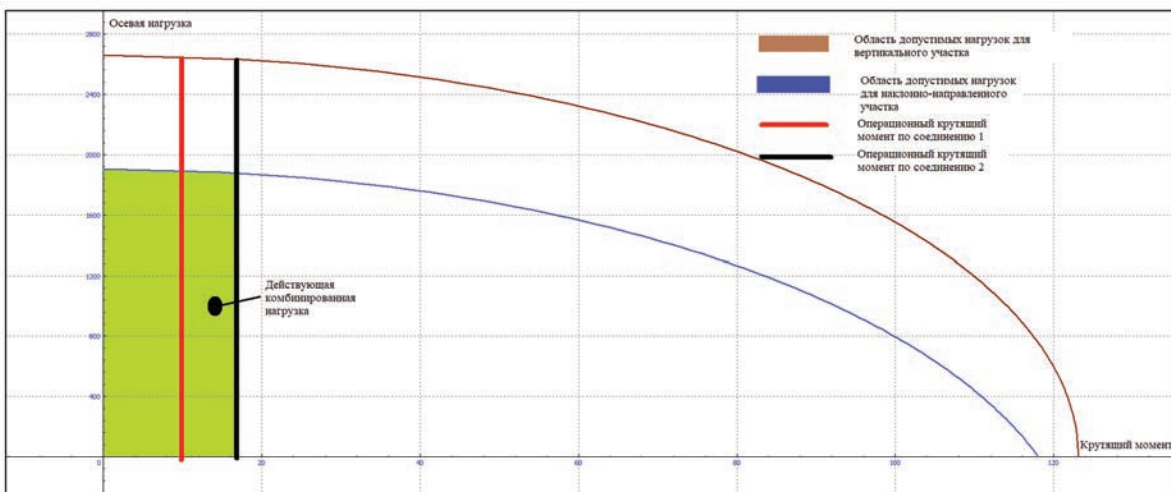


Рис. 5. Область допустимых комбинированных нагрузок «осевая нагрузка-крутящий момент» для типоразмера 177,8x9,19 мм N80

с интенсивностью искривления $1,5^\circ/10$ м, то расчетная комбинированная нагрузка является критичной для соединения №1, т.к. превышает предельное значение сжимающей нагрузки. В случае освобождения колонны при заклинке с приложенным операционным моментом 12 кН·м соединение №1 не способно сохранить целостность ввиду превышения предельного операционного крутящего момента (рис. 5).

Таким образом, одним из эффективных методов, который позволяет решить проблемы с потерей устойчивости при спуске в горизонтальные интервалы является спуск с вращением, при котором трение скольжения переходит в трение качения.

И для инженера важно правильно определить критерии выбора резьбового соединения.

Выделим основные конструктивные особенности резьбового соединения для спуска в наклонно-направленную и горизонтальную скважину (рис. 6):

- 1. Торцевой упор.** Торцевые упоры кроме уплотняющей функции, служат ограничением осевого перемещения и воспринимают крутящий момент при вращении обсадной колонны.
- 2. Форма профиля резьбы.** Для обеспечения высокой прочности соединения при действии осевой и изгибающей нагрузок применяется крюкообразная или клиновидная резьба. (рис. 7).
- 3. Газогерметичное уплотнение «металл-металл».** Соединения с уплотнением металл-металл имеют одно или несколько уплотнений и отличаются высокой герметичностью при давлении как жидкостью, так и газом. Для надежной герметизации применяются уплотнительные поверхности конической, сферической или цилиндрической форм, обеспечивающие после свинчивания соединения плотную посадку с заданным диаметральным натягом.

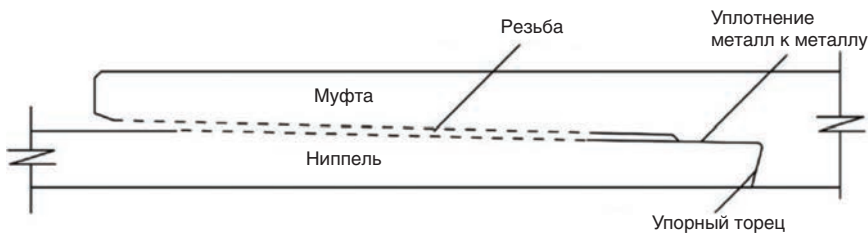


Рис. 6. Ключевые элементы резьбового соединения

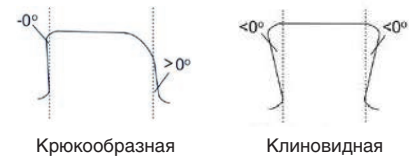


Рис. 7. Формы профиля премиальных резьбовых соединений

В зависимости от конструктивных особенностей соединения максимальный операционный момент будет отличаться для соединений. Например, на рис. 7 представлено сравнение соединения поколений Pro (ТМК UP Centum и ТМК UP PF ET) с соединением поколения Moment (ТМК UP Moment).

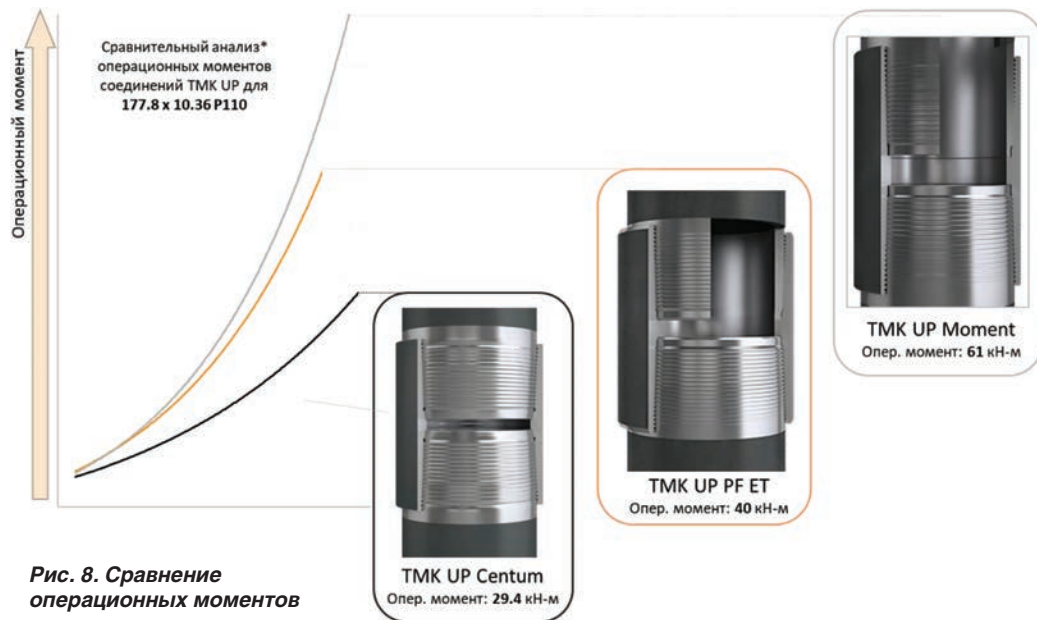


Рис. 8. Сравнение операционных моментов

Клиновидный профиль резьбы ТМК UP Moment с прогрессирующим шагом по всей длине соединения (рис. 9), что резко увеличивает способность обеспечить высокий операционный момент в отличие от классических премиальных соединений с трапецидальным профилем. Обладает 100% эффективностью на растяжение и сжатие.



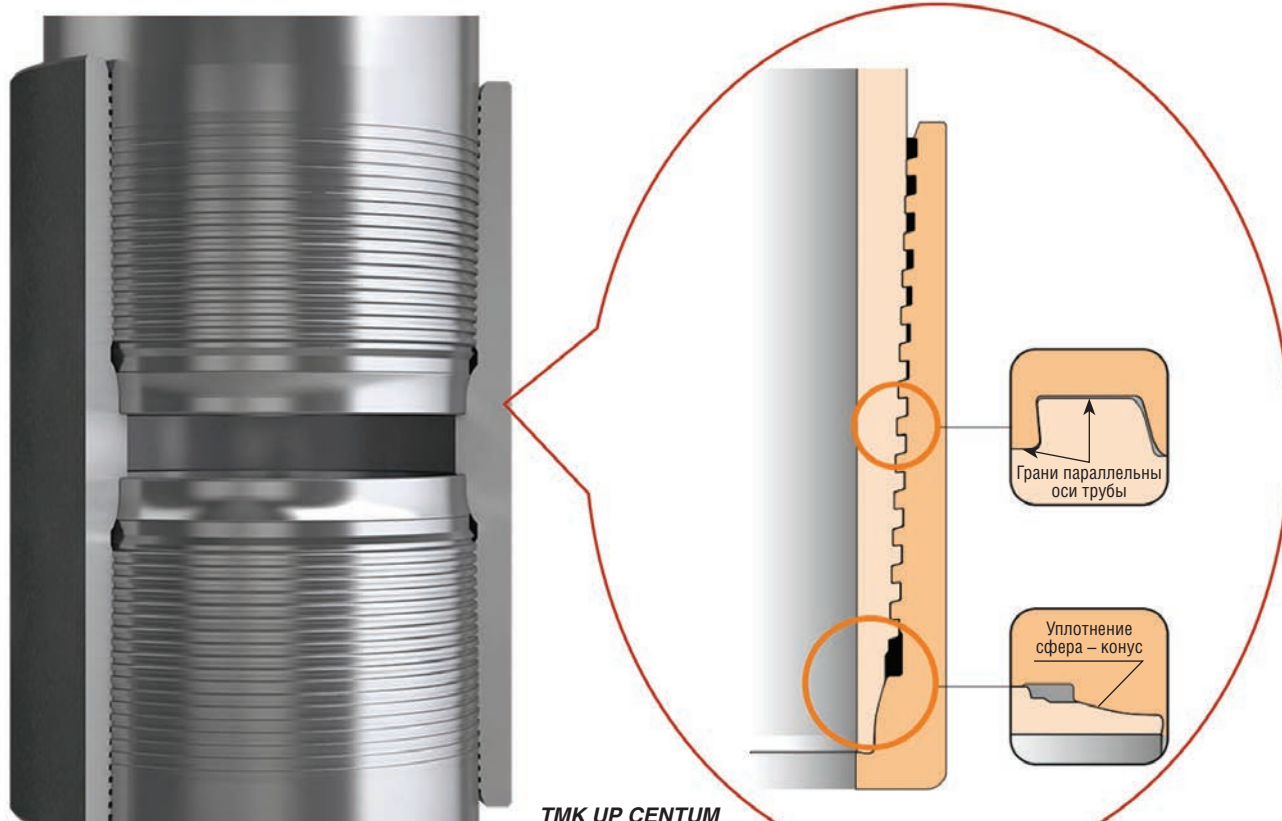
Рис. 9. Профиль соединения ТМК UP Moment



PRO серия.

Линейка премиальных соединений, обладающих исключительной устойчивостью к растягивающим, сжимающим и изгибающим нагрузкам при избыточном внутреннем и наружном давлениях.

TMK UP™ CENTUM – быстросборное упорное газогерметичное премиальное соединение. Испытано по стандарту API 5C5 CAL IV. Прочность соединения равна прочности тела трубы и обеспечивает 100% эффективность на растяжение и сжатие. Уплотнение металл-металл и профиль резьбы обеспечивают высокую газогерметичность при особо сложных условиях эксплуатации (пределных комбинированных изгибающих, сжимающих, растягивающих нагрузках, крутящем моменте, агрессивных средах). Может применяться на SAGD проектах и для циклического стимулирования водяным паром CSS.



Заключение

По результатам рассмотрения явления продольной устойчивости в горизонтальных скважинах и расчета локальных изгибающих напряжений можно заключить следующее:

- При выборе соединений необходимо учитывать изгибающие напряжения, возникающие за счет кривизны скважины и учета жесткости тела трубы.
- Наиболее эффективным способом снизить риски не доведения колонны до проектной глубины, разрушения при расхаживании и вращении колонны является применение упорных резьбовых соединений с эффективностью на сжатие 100%.
- Премиальные упорные резьбовые соединения TMK отличаются от соединений ГОСТ и API подтвержденными стендовыми испытаниями при комбинированном нагружении и моментных нагрузках.
- Для обеспечения высокого операционного момента во время спуска с вращением необходимо применение специальных конструкций соединений с клиновидным типом профиля резьбы.



ПАО «ТМК»
105062, Москва, ул. Покровка, д. 40, стр. 2а
тел. (495) 775-76-00
e-mail: tmk@tmk-group.com
www.tmk-group.ru

ЛИТЕРАТУРА:

1. А. Р. Агишев, С. А. Рекин, Павлов А. М., ООО «ТМК-Премиум Сервис», Д. А. Федосеев, ООО «СамараНИПИнефть». Применение упорного резьбового соединения для эффективного заканчивания горизонтальных скважин. Бурение и нефть, 10/2018.
2. Kuru, E., Martinez, A., and Miska, S., 1999, «The Buckling Behavior of Pipes and Its Influence on the Axial Force Transfer in Directional Wells», Proceedings, SPE/IADC Drilling Conference, Paper No. SPE/IADC 52840, Amsterdam, Holland.
3. Bending Stress Magnification in Constant Curvature Doglegs With Impact on Drillstring and Casing. P.R. Paslay, Techaid Corp., and E.P. Cernocky, Shell Development Co. SPE 22547.
4. С. А. Рекин, А. Ш. Янтурин; под ред. А. Ш. Янтурина. Устойчивость, упругая деформация, износ и эксплуатация бурильных и обсадных колонн (механика системы «колонна-скважина-пласт»). Санкт-Петербург: Недра, 2005 (Уфа: Уфимский полиграфический комбинат) – 460 с.