



УДК 622.279.5(211)

## ПРОМЫСЛОВОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГИБКИХ ТРУБ В СВАЖИНЕ



### INDUSTRIAL DEFINITIONS OF FRICTION FORCES DURING MOTION OF A COILED TUBING IN A WELL

**Мацко Антон Владимирович**

инженер 1-ой категории,  
ООО «Газпром подземремонт Уренгой»  
anton\_matsko@mail.ru

**Лукьянов Владимир Тимофеевич**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры разработки  
и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений,  
Северо-Кавказский федеральный университет  
lukianov50@mail.ru

**Matsko Anton Vladimirovich**

category 1 engineer,  
Gazprom zempremont Urengoy  
anton\_matsko@mail.ru

**Lukyanov Vladimir Timofeyevich**

Doctor of Engineering, Associate Professor,  
Professor of the Department of Development  
and Operation of oil and gas fields,  
North Caucasian Federal University  
lukianov50@mail.ru

**Аннотация.** В статье обосновывается необходимость учета сил трения при движении гибкой насосно-компрессорной трубы (ГНКТ) через уплотнительный элемент (УЭ) устьевого герметизатора скважины в ходе проведения в ней технологических операций при избыточном давлении на устье. Приведены и проанализированы результаты промысловых определений сил трения ГНКТ (со смазкой и без смазки трубы) в скважине 12003 Ямбургского месторождения. Установлено отсутствие однозначной связи между силами трения и текущим износом УЭ при одинаковых давлениях в герметизаторе, что упрощает вычисление этих сил в процессе работы, когда текущий контроль его износа невозможен. Получены графики и формулы для расчета сил трения. Установлено, что наличие смазки уменьшает силы трения ГНКТ не менее, чем в 2 раза.

**Annotation.** In the article the necessity of integrating forces of friction when driving coiled tubing through the sealing element wellhead sealant wells during it operations with excessive pressure at the wellhead. Lists and analyzes the results of fishing definitions frictional forces coiled tubing (with lubrication and without lubrication pipes) in the well № 12003 Yamburg field. Established that there is no unambiguous connection between the forces of friction and wear of current sealing element under similar pressures in wellhead hermetizer, which simplifies the calculation of these forces in the course of work, when it is not possible to control wear. Sourced graphics and formulas to calculate the frictional forces. It has been established that the presence of a lubricant reduces friction forces coiled tubing not less than 2 times.

**Ключевые слова:** колтюбинг, устьевого герметизатор, уплотнительный элемент, износ, смазка труб, расчет сил трения.

**Keywords:** coiled tubing, wellhead hermetizer, sealing element, wear, lubrication pipes, calculation of frictional forces.

С учетом того, что объемы работ с применением колтюбинга увеличиваются, а основными объектами становятся глубокозалегающие пласты и шельфовые проекты, в которых используют преимущественно высокотехнологичное оборудование, актуальна задача разработки методов и средств, направленных на уменьшение коэффициента трения и снижение напряженного режима работы гибких насосно-компрессорных труб (ГНКТ).

Повышенное трение уменьшает диапазон прикладываемых на ГНКТ нагрузок при расхаживании и усложняет контроль осевой нагрузки на забой. Доведение нагрузки на забой является весьма актуальной проблемой в колтюбинговых технологиях, минимизация сил сопротивления становится важной задачей на пути решения этой проблемы.

Силу натяжения ГНКТ у инжектора  $W$  при движении труб вниз с циркуляцией промывочной жидкости (например, при вымыве пропантовой пробки) можно определить из соотношения:

$$W = W_c - W_p - W_d - F_c - F_y, \quad (1)$$

где  $W_c$  – собственный вес ГНКТ ниже инжектора при движении их вниз при наличии циркуляции промывочной жидкости;  $W_p$  – выталкивающая сила, действующая вдоль оси трубы ниже герметизатора из-за наличия под ним избыточного давления;  $W_d$  – осевая нагрузка на долото;  $F_c$  – сила трения ГНКТ о стенки НКТ при движении гибких труб вниз с промывкой;  $F_y$  – сила трения ГНКТ в уплотнительном элементе герметизатора устья скважины (УЭ).

*Собственный вес колонны ГНКТ  $W_c$  в вертикальной скважине, без учета сил трения о стенки НКТ вычисляется как произведение длины и веса погонного метра труб в скважинном флюиде. При этом могут учитываться давления в трубах и затрубном. Между тем, большинство ремонтируемых*



скважин, особенно в Сибири, наклонно-направленные, для которых игнорирование сил трения при расчете  $W_c$  может привести к неприемлемым ошибкам.

*Выталкивающая сила*  $W_p$  из-за наличия под УЭ избыточного давления определяется по формуле:

$$W_p = P_y \cdot S_6, \text{ причем } S_6 = \frac{1}{4} \pi D_6^2, \quad (2)$$

где  $P_y$  – избыточное давление на устье под герметизатором;  $S_6$  – площадь сечения ГНКТ.

*Осевая нагрузка на долото*  $W_d$  задается исходя из технологических соображений (устойчивая работа винтового забойного двигателя (ВЗД), приемлемая скорость разрушения забоя) и при использовании ГНКТ обычно не превышает 0,8–1,0 кН на 1 см диаметра долота.

Расчету сил трения ГНКТ о стенки НКТ  $F_c$  в скважине посвящено много работ, например [2, 3]. В книге М.М. Александрова [1] приводятся соответствующие аналитические зависимости для вычисления  $W_c$  бурильной колонны на прямолинейных и криволинейных участках зенитного и азимутального искривления скважины. Практическое использование этих формул затруднительно из-за недостаточной формализации методов расчета – для каждого участка скважины (снизу – вверх) оператор должен назначать формулу расчета. Этой особенности аналитического подхода лишены численные методы расчета, приведенные в статьях [2, 3] и других, где вычисление сил трения ведется по одинаковым формулам по участкам между точками замера инклинометром. Заметим, что в обоих методах расчета предполагается, что изгиб НКТ повторяет искривление скважины.

Существует различное программное обеспечение (ПО), основными разработчиками которого являются: ООО «Бурсофтпроект», Halliburton, Schlumberger. ПО успешно определяет силы трения в скважине, но существуют некоторые недостатки. Необходимость проведения предварительных исследований по определению коэффициента трения ГНКТ о стенки НКТ в реальных условиях скважины – в зависимости от смазочных свойств жидкости, разницы диаметров НКТ и ГНКТ, наличия забойного двигателя. Целесообразно определение  $W_c$  непосредственно по натяжению ГНКТ у инжектора, при котором автоматически учитывается сила трения  $F_c$  и другие трудно учитываемые факторы, влияющие на замеренный «собственный» вес инструмента (например, вибрация труб при циркуляции жидкости в скважине, работе забойного двигателя и др.).

При таком определении  $W_c$  имитируется технологический процесс, для которого необходимо знание собственного веса ГНКТ в скважине. Например, перед началом бурения производится медленный (соответствующий скорости бурения) спуск трубы с циркуляцией и замеряется натяжение на инжекторе. При открытом устье замеряемое натяжение будет соответствовать величине  $W = W_c - F_c$ ; при закрытом устье – величине  $W = W_c - F_c - F_y - W_p$ .

Еще одним важным недостатком является отсутствие учета сил трения в узлах колтюбинговой установки. При использовании колтюбинга в скважине с герметизированным устьем, в том числе в процессе ее углубления, вымыва песчаной пробки, контроль величины осевой силы на нижнем конце ГНКТ затрудняется из-за трения движущихся труб в УЭ герметизатора при его поджатии. Более того, неконтролируемое изменение сил трения в УЭ может привести к осложнениям и авариям и при других технологических операциях.

Представляется очевидным, что повышение безопасности спуска и проведения технологических операций с ГНКТ требуют контроля сил трения в УЭ, основанного на их экспериментальной количественной оценке.

Начальную силу трения между УЭ и ГНКТ можно рассчитать, как произведение величин давления  $P$ , коэффициента трения скольжения  $f$  и боковой поверхности ГНКТ на длине уплотняющего элемента по формуле:

$$F_{yn} = f \cdot P \cdot \pi D_6 (l \pm \Delta l), \quad (3)$$

где  $l$ ,  $\Delta l$  – соответственно длина УЭ и изменение этой длины при его деформации.

Пример расчета по определению давления  $P$  описывается в книге С.М. Вайнштока [5], но недостатком данных расчетов является то, что авторы относят УЭ к мягким сальниковым набивкам с принудительным поджимом к уплотняемой поверхности. Ввиду различных физико-механических свойств сальниковой набивки и эластичного УЭ, данный расчет не может использоваться для получения достоверных результатов. Величину  $\Delta l$  оценить невозможно, так как она прямо пропорциональна износу, значение которого в процессе эксплуатации неизвестно.

Представляется очевидным, что силы трения в УЭ требуют экспериментальной количественной оценки.

С этой целью, на Ямбургском нефтегазоконденсатном месторождении, в скважине № 12003 были проведены промысловые замеры сил трения 38-мм ГНКТ в УЭ с разной степенью его износа. Использовалась установка М-20 (ООО «Газпром подземремонт Уренгой»), оснащенная герметизатором М20.52.00.000 с осевым поджатием уплотнительного элемента РАНТ-10.25.00.010-01 из полиуретана Адипрен L-100.



Результаты наблюдений показаний ИВЭ (индикатор веса электронный) при подъеме и спуске ГНКТ (с их смазкой и без смазки) приведены в (табл. 1 и 2.) Для удобства за эквивалент силы трения в УЭ принимались абсолютные величины изменения усилия на инжекторе за счет трения (без учета знака (-) при спуске и (+) при подъеме труб). Из промысловых наблюдений было принято, что если новый УЭ имеет внутренний диаметр 38 мм, то его средний износ имеет место при увеличении внутреннего диаметра УЭ до величины  $\Delta = 6$  мм (внутренний диаметр до 44 мм), а максимально допустимый – при  $\Delta = 16$  мм (диаметр 54 мм), где  $\Delta$  – увеличение внутреннего диаметра УЭ из-за его износа.

**Таблица 1** – Изменения усилия на инжекторе при подъеме и спуске ГНКТ (со смазкой) в зависимости от давления масла в гидроцилиндре Р<sub>н</sub>

Давление Р <sub>н</sub> , МПа	Номер опыта				Средне- значение	Примечания
	1	2	3	4		
Усилие на инжекторе/Изменение усилия, кН						
0	54,8	54,0	53,0	54,1	54,0	Новый УЭ. Операция – <i>подъем</i> ГНКТ 6 м/мин. Смазка – ВМР+КМЦ. Скважина заглушена
5	55,3/0,5	54,6/0,6	53,6/0,6	54,4/0,3	54,5/0,5	
10	56,0/1,2	54,4/0,4	53,8/0,8	54,6/0,5	54,7/0,7	
15	56,9/2,1	55,1/1,1	55,1/2,1	55,6/1,5	55,7/1,7	
20	57,5/2,7	57,0/3,0	56,8/3,8	57,3/3,2	57,2/3,2	
25	58,1/3,3	57,7/3,7	57,3/4,3	57,8/3,7	57,7/3,7	
30	59,5/4,7	59,0/5,0	58,5/5,5	58,2/4,1	58,8/4,8	
0	14,6	15,7	15,0	15,2	15,1	Средний износ УЭ. Операция – <i>спуск</i> 12 м/мин. Смазка – ВМГЗ. Давление герметизации УЭ 15,7 МПа. Давление на устье 2,5 МПа
5	14,0/0,6	14,8/0,9	14,9/0,1	15,0/0,2	14,7/0,4	
10	13,2/1,4	14,6/1,1	14,4/0,6	14,5/0,7	14,2/0,9	
15	12,9/1,7	14,5/1,2	13,5/1,5	13,0/2,2	13,5/1,6	
20	12,5/2,1	13,5/2,2	12,6/2,4	12,8/2,4	12,9/2,2	
25	11,7/2,9	12,6/3,1	11,3/3,7	12,0/3,2	11,9/3,2	
30	10,2/4,4	10,9/4,8	10,5/4,5	10,0/5,2	10,4/4,7	
0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	Максимальный износ УЭ. Операция – <i>спуск</i> 1,9 м/мин. Смазка – ВМГЗ. Давление герметизации УЭ 19,0 МПа. Давление на устье 2,2 МПа
5	-0,5/0,6	-1,0/1,1	0,1/0,1	0,1/0,1	-0,4/0,6	
10	-1,6/1,7	-0,8/0,9	-0,4/0,6	-0,6/0,8	-0,9/1,1	
15	-2,5/2,6	-1,5/1,6	-1,7/1,9	-2,0/2,2	-1,9/2,1	
20	-2,6/2,7	-2,7/2,8	-2,2/2,4	-2,9/3,1	-2,6/2,8	
25	-3,8/3,9	-4,0/4,1	-3,5/3,7	-3,0/3,2	-3,6/3,8	
30	-5,2/5,3	-6,1/6,2	-5,0/5,2	-6,0/6,2	-5,6/5,8	

Обозначения: 1) ВМР – скважинный водо-метанольный раствор;  
2) ВМГЗ – всесезонное масло гидравлическое загущенное.

**Таблица 2** – Изменения усилия на инжекторе при спуске ГНКТ (без смазки) в зависимости от давления масла в гидроцилиндре Р<sub>н</sub>

Давление Р <sub>н</sub> , МПа	Номер опыта				Среднее значение	Примечания
	1	2	3	4		
1	2	3	4	5	6	7
Усилие на инжекторе/Изменение усилия, кН						
0	54,8	54,0	53,7	53,9	54,1	Новый УЭ. Операция – <i>спуск</i> ГНКТ 6 м/мин. Скважина заглушена
5	54,0/0,8	53,1/0,9	53,0/0,7	53,7/0,2	53,5/0,6	
10	53,0/1,8	52,2/1,8	52,6/1,1	53,1/0,8	52,7/1,4	
15	51,6/3,2	49,5/4,5	49,0/4,7	48,8/5,1	49,7/4,4	
20	50,2/4,6	48,9/5,1	48,4/5,3	48,1/5,8	48,9/5,2	
25	47,0/7,8	46,5/7,5	45,6/8,1	45,1/8,8	46,1/8,0	
30	44,1/10,7	41,5/12,5	41,7/12,0	43,1/10,8	42,6/11,5	



Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
0	32,3	32,8	33,4	33,0	32,9	Средний износ УЭ. Операция – спуск ГНКТ 12 м/мин. Давление герметизации УЭ 15,7 МПа. Давление на устье 2,5 МПа
5	31,1/1,2	31,0/1,8	32,3/1,1	32,6/0,4	31,8/1,1	
10	29,5/2,8	30,6/2,2	31,3/2,1	31,6/1,4	30,8/2,1	
15	29,0/3,3	29,6/3,2	30,2/3,2	29,0/4,0	29,5/3,4	
20	26,5/5,8	26,6/6,2	27,0/6,4	26,6/6,4	26,7/6,2	
25	21,0/11,3	21,2/11,6	25,0/8,4	23,0/10,0	22,6/10,3	
30	15,5/16,8	17,0/15,8	21,0/12,4	18,0/15,0	17,9/15,0	Максимальный износ УЭ. Операция – спуск ГНКТ 1,9 м/мин. Давление герметизации УЭ 19,0 МПа. Давление на устье 2,2 МПа
0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	
5	-1,0/1,1	-1,0/1,1	-1,2/1,4	-1,0/1,2	-1,1/1,3	
10	-3,2/3,3	-1,6/1,7	-1,8/2,0	-1,2/1,3	-2,0/2,2	
15	-4,5/4,6	-2,7/2,8	-3,1/3,3	-3,6/3,8	-3,5/3,7	
20	-5,0/5,1	-3,7/3,8	-4,2/4,4	-4,6/4,8	-4,4/4,6	
25	-7,0/7,1	-7,5/7,6	-8,7/8,9	-7,5/7,7	-7,7/7,9	
30	-8,0/8,1	-12/12,1	-11/11,2	-9,9/10,1	-10,2/10,4	

Примечание: при поджатии более 20 МПа, вес на ИВЭ начинает колебаться и скорость подъема ГНКТ снижается (как при наличии смазки, так и без нее).

Графически, приведенные в таблицах средние (по 4-м опытам) данные, представлены на (рис. 1 и 2).

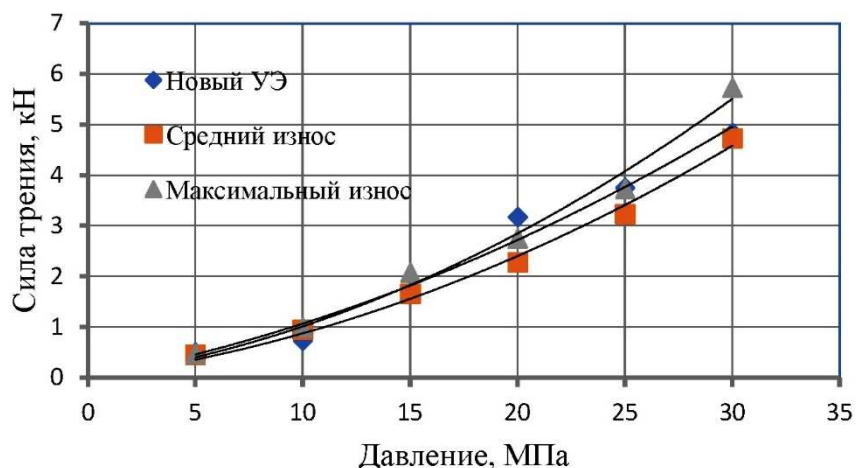


Рисунок 1 – Зависимость силы трения ГНКТ со смазкой в УЭ от давления в герметизаторе

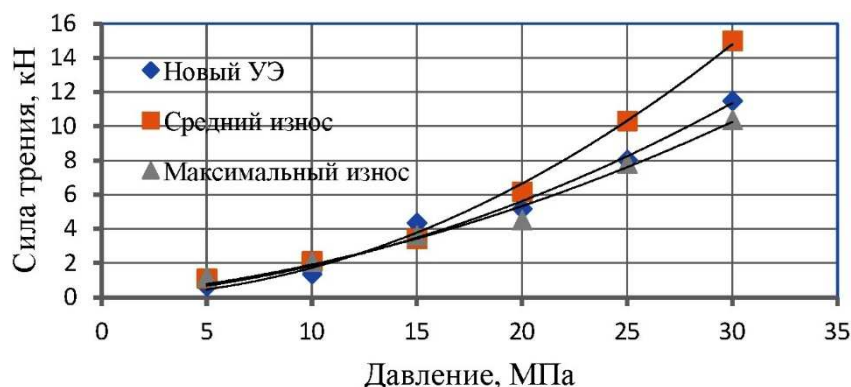


Рисунок 2 – Зависимость силы трения ГНКТ без смазки в УЭ от давления в герметизаторе

Из таблиц 1 и 2 графиков на рисунках 1 и 2 видно примерное равенство сил трения ГНКТ при разной степени износа УЭ и одинаковых давлениях в герметизаторе, что можно объяснить примерным равенством сил прижатия ГНКТ к УЭ (которые пропорциональны осевым силам сжатия УЭ [4]) вне



зависимости от его износа. Действительно, нагнетаемое в гидроцилиндр (под его полый поршень) давление ( $P_n$ ) масла (MobilUnivisHWI 26) обуславливает осевую силу, которая передается поршнем на торец опорной втулки. Геометрические характеристики герметизатора M20.52.00.000 таковы, что площадь поперечного сечения опорной втулки в 2 раза больше площади сечения полого поршня, поэтому действующая на опорную втулку осевая сила создает на направляющее кольцо в 2 раза меньшее давление ( $P_{нк}$ ), чем под полым поршнем, то есть  $P_{нк} = P_n/2$ .

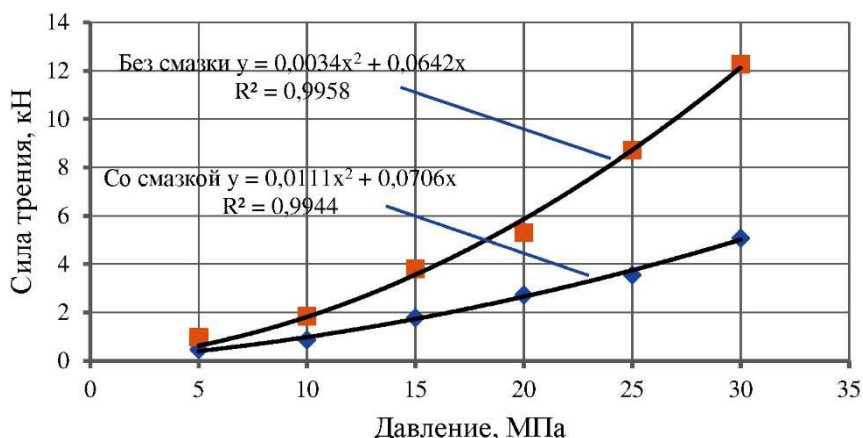
В свою очередь, направляющее кольцо давит на нижний торец УЭ и, в зависимости от степени износа УЭ по внутреннему диаметру, передает на него давление, равное, в начале деформации УЭ,  $\sigma_z = P_{нк} \cdot S_{нк}/S_{уэ}$ , где  $S_{нк}$ ,  $S_{уэ}$  – площади поперечного сечения соответственно направляющего кольца и уплотнительного элемента с учетом его износа.

Внутренний диаметр направляющего кольца соответствует диаметру ГНКТ ( $D_T$ ), а наружный равен внутреннему диаметру обоймы герметизатора ( $d_o$ ). Следовательно,  $S_{нк} = (\pi/4) \cdot (d_o^2 - D_T^2)$ . В свою очередь,  $S_{уэ} = (\pi/4) \cdot [d_o^2 - (D_T + \Delta)^2]$ . С учетом вышеприведенных замечаний окончательно можно записать формулу для вычисления осевого давления на УЭ в момент начала его сдавливания:

$$\sigma_z = \frac{P_n}{2} \cdot \frac{(d_o^2 - D_T^2)}{[d_o^2 - (D_T + \Delta)^2]} \quad (4)$$

При имеющихся значениях  $d_o = 90$  мм,  $D_T = 0,038$  м и  $\Delta =$  до 0,006–0,016 м расчетная начальная величина  $\sigma_z$  достигает  $(0,54-0,64) \cdot P_n$ , то есть увеличивается в 1,08–1,28 раза. По мере осевой деформации, внутренний диаметр УЭ уменьшается, первоначальный зазор между ГНКТ и УЭ исчезает и  $\sigma_z$ , как и при отсутствии износа УЭ, вновь становится равным  $\sigma_z = P_{нк} = P_n/2$ , что и обуславливает примерное равенство сил трения ГНКТ при разной степени износа УЭ и одинаковых давлениях в герметизаторе.

Это обстоятельство имеет важное практическое значение, поскольку позволяет оценивать и учитывать величины сил трения между ГНКТ и УЭ в процессе проведения в скважине технологических операций без необходимости определения текущего (и, вообще говоря, неизвестного) износа УЭ. Для этого следует использовать графики на рисунке 3, построенные без учета текущего износа УЭ при наличии смазки и при ее отсутствии. Заметим, что смазка поверхности ГНКТ позволяет уменьшить силы трения в УЭ не менее, чем в 2 раза.



**Рисунок 3** – Зависимость средней силы трения ГНКТ в УЭ (со смазкой и без смазки) без учета его износа от давления в герметизаторе

В результате получены уравнения регрессии для условий, подразумевающих наличие смазочного материала (5) и при его отсутствии (6):

$$F = 0,0111 \cdot P_n^2 + 0,0706 \cdot P_n; \quad (5)$$

$$F = 0,0034 \cdot P_n^2 + 0,0642 \cdot P_n. \quad (6)$$

Таким образом, проведенные промышленные исследования позволили оценить силы трения возникающие в герметизирующем узле установки и получить простые и доступные для практического использования зависимости при расчетах сил трения ГНКТ в процессе их движения через УЭ герметизатора устья. Полученные зависимости могут использоваться совместно с ПО при моделировании работы ГНКТ в скважине.

### Литература

1. Александров М.М. Взаимодействие колонн труб со стенками скважины. – М. : Недра, 1982. – 144 с.
2. Johancsik C.A., Friesen D.B., Dawson R. Torque and drag in directional wells – prediction and measurement // J.P.T. – 1987, June. – P. 987–991.



3. Лукьянов В.Т. Определение сил сопротивления движению бурильного инструмента на Уренгойском месторождении // Известия вузов. Нефть и газ. – 1997. – № 2. – Р. 31–33.
4. Вайншток С.М., Молчанов А.Г., Некрасов В.И., Чернобровкин В.И. Подземный ремонт и бурение скважин с применением гибких труб. – М. : Изд-во Акад. горных наук, 1999. – 223 с.
5. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов : учебник для втузов – 9-е изд., перераб. – М. : Наука. гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 512 с.

### References

1. Alexandrov M.M. Interaction of tubing strings with the walls of a well. – М. : Nedra, 1982. – 144 p.
2. Johancsik C.A., Friesen D.B., Dawson R. Torque and drag in directional wells – prediction and measurement // J.P.T. – 1987, June. – P. 987–991.
3. Lukyanov V.T. Determination of Resistance Forces for Drilling Tool Movement at Urengoi Field // Izvestia vuzov. Oil and gas. – 1997. – № 2. – P. 31–33.
4. Vainshtok S.M., Molchanov A.G., Nekrasov V.I., Chernobrovkin V.I. Underground repair and drilling of wells with application of coiled tubes. – М. : Proc. of Academy of Mining Sciences, 1999. – 223 p.
5. Feodos'ev V.I. Resistance of Materials : textbook for tutorials – 9th edition, interpretation. – М. : Nauka. Ch. ed. fiz. mat. lit., 1986. – 512 p.