

УДК 620.168

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОЙ ШТАНГОВОЙ КОЛОННЫ

SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF METALLOPOLYMERIC ROD STRING

Антоненко А. А., Шайдаков В. В., Людвиницкая А. Р.
ООО Инжиниринговая компания «Инкомп-нефть», г.Уфа, Российская Федерация

A.A. Antonenko, V.V. Shaydakov, A.R. Lyudvinitzkaya
LLC Engineering Company "Inkomp-neft", Ufa, Russian Federation
e-mail: incompneft@yandex.ru

Аннотация. Штанговые колонны, как и любой вид оборудования подвержен «моральному» и физическому старению. Сегодня наиболее перспективной конструкцией, по мнению авторов статьи, является металлополимерная штанговая колонна (МШК). Для этой конструкции характерна непрерывность, универсальность, легкость монтажа и обслуживания. Для этой штанговой колонны существует задача синтеза конструкции, решение которой авторы представляют в данной статье, опираясь на опыт синтеза конструкций стальных канатов. Исходя из существующих расчетов максимальных нагрузок приходящихся на точку подвеса штанговой колонны Вирновского А.С. и характерных особенностей по расчету механических показателей МШК, были уточнены коэффициенты пропорциональности входящие в эту формулу. По уточненным формулам были построены графические зависимости.

Основными преимуществами МШК являются простота монтажа, легкость транспортирования на барабанах относительно небольшого диаметра, использование со стандартным оборудованием устья, существующими приводами штанговых установок. Но имеется ряд нерешенных на сегодняшний день вопросов, требующих особого внимания. К ним относится выбор рациональной конструкции, расчет параметров штанговой колонны. В данной статье рассматриваются некоторые из этих задач.

Abstract. Rod string, like any kind of equipment is subject to "moral" and physical aging. Today, the most promising construction, according to authors of the article, is metallopolymeric rod string (MRS). This construction characterized by continuity, flexibility, easy installation and maintenance. For this rod string there is a problem of the construction synthesis, the solution of which the authors presented in this article, based on the experience of synthesis constructions of steel ropes. There

were specified proportionality coefficients in this formula, based on the existing calculation of the maximum load attributable to the suspension point of rod string Virnovskogo A.S. and characteristic features of convenience of mechanical parameters MRS. According to the specified formulas were constructed characteristic curve.

MSHK main advantages are ease of installation, ease of transporting the drums of relatively small diameter, the use of the standard equipment of the mouth, the existing drive rod installations. But there are a number of unresolved issues today that require special attention. These include the choice of a rational design, dimensioning of rod string. This article discusses some of these problems.

Ключевые слова: металлополимерная штанговая колонна, синтез конструкции, диаметр пряди, модуль упругости, угол повива.

Keywords: metallopolymeric rod string, the synthesis of construction, the diameter of the strands, the elastic modulus, the angle of helix.

В современной нефтедобывающей отрасли России значительная доля добываемой нефти приходится на штанговые насосные установки, особенно в «старых» нефтяных регионах. Особое внимание ряда известных конструкторов и ученых привлекает штанговая колонна и ее работа в скважинных условиях, а также вопросы повышения надежности этого оборудования. Традиционно в качестве штанговых колонн применяются многосоставные конструкции, состоящие из непосредственно насосных штанг, соединяемых посредством муфтовых переходников. Все элементы на сегодняшний день могут выполняться как из различных сталей и сплавов, так и из полимерных материалов, примером штанг из неметаллических материалов выступают стеклопластиковые насосные штанги. Как и любое оборудование, эти штанговые колонны имеют свои недостатки, выявленные за долгие годы их использования в штанговых насосных установках, а также происходит их «моральное» старение связанное с развитием техники и технологии в мире, появлением новых конструкционных материалов, необходимостью расширения функциональных возможностей и, что немаловажно, необходимостью следовать по пути экономически и экологически рационального использования. К основным недостаткам можно отнести: большое количество соединений штанговой колонны, что подразумевает длительность и трудоемкость процесса монтажа и демонтажа штанг, а также контроля технического состояния соединений; ограниченные функциональные возможности. В виду этого были попытки внедрения непрерывных штанговых колонн, но они не нашли широкого применения, так как требовали использования нестандартного оборудования, а в частности самих приводов; не решался вопрос транспортировки, в качестве примера можно привести непрерывную насосную штангу «Corod» компании «Weatherford» для транспортирования которой необходимо использовать установленный на шасси барабан в диаметре составляющий минимум 6 м. В тоже время непрерывные штанговые колонны

позволяют снизить затраты времени и труда при проведении монтажно-демонтажных работ.

В данном исследовании мы хотели показать, что наиболее перспективной конструкцией, позволяющей объединить достоинства вышеописанных штанговых колонн, является металлополимерная штанговая колонна (МШК). В общем случае она представляет собой непрерывную систему, состоящую из полимерных материалов с армирующими грузонесущими элементами, роль которых могут выполнять стальные канаты малых диаметров, проволока, полимерные волокна, ленты, нити [4, 5].

Основными преимуществами МШК являются простота монтажа, легкость транспортирования на барабанах относительно небольшого диаметра, использование со стандартным оборудованием устья, существующими приводами штанговых установок. Но имеется ряд нерешенных на сегодняшний день вопросов, требующих особого внимания. К ним относится выбор рациональной конструкции, расчет параметров штанговой колонны. В данной статье рассматриваются некоторые из этих задач.

МШК, в отличие от стержневых штанг, представляющих собой, в общем случае, металлический или полимерный стержень определенной длины, состоящий из совокупности отдельных элементов грузонесущего органа, в виде каната (канатов), полимерного армированного канала и полимерной армированной оболочки. Каждый из них выполняет определенную функцию и в общей конструкции обеспечивает работу штанговой колонны.

Особое внимание заслуживает металлополимерная штанговая колонна, описанная в патенте [5] и представленная на рисунке 1.

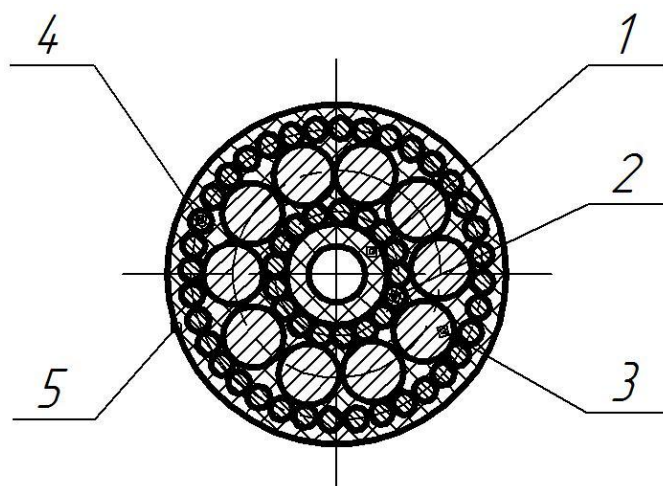


Рисунок 1. Металлополимерная штанговая колонна с внутренним каналом

1 – канал образованный полимерной трубой; 2 – прядь внутреннего армировочного слоя; 3 – пряди грузонесущего армировочного слоя; 4 – пряди наружного армировочного слоя; 5 – наружный полимерный слой

Данная МШК может использоваться при одновременно-раздельной эксплуатации скважины, а также при дозировании химического реагента в скважину при эксплуатации скважины при различного рода осложнениях, помимо этого существует возможность установки оптоволоконного кабеля для проведения наблюдений за состоянием скважинных условий, контроля за состоянием МШК при ее работе и возможность предупреждения ее обрыва.

Исходя из особенностей конструкции МШК, возникает необходимость описания ее конструкции с учетом особенностей расположения каждой отдельной составляющей. Для обоснования параметров геометрии штанговой колонны воспользуемся известными зависимостями, используемыми при синтезе конструкции стальных канатов [2].

В общем виде прядь армирующего элемента МШК представляет собой простую винтообразную линию, которая расположена на некоем базовом цилиндре. Эта линия пересекает образующую этого цилиндра под определенным углом, который является постоянной величиной, этот угол называется углом свивки пряди. Соответственно и ось этой пряди будет иметь такую же винтообразную линию. Так как армирующая прядь МШК может быть выполнена из канатов малого диаметра, которые в свою очередь состоят из отдельных элементов, имеющих сложную пространственную форму. Одно из допущений – расчет связан с осью пряди, прядь принимается за монолитную конструкцию.

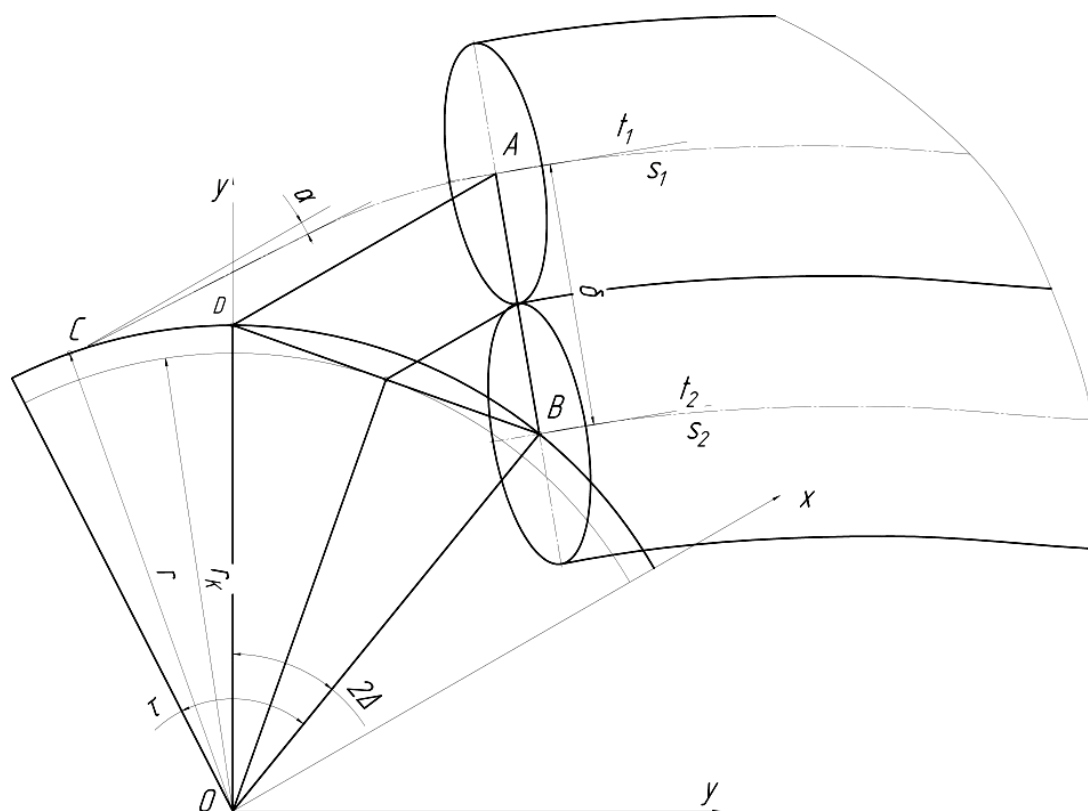


Рисунок 2. Схема линейного тангенциального контакта прядей [2]

При формировании МШК также зададимся необходимостью обеспечения линейного смежного контакта между пряжами, что позволит синтезировать более прочную и жесткую систему. Под линейным смежным контактом будем подразумевать непрерывное соприкосновение друг с другом по линии на протяжении всей длины соседних пряжей между собой. Исходя из этого, расстояние между осями пряжей будет постоянно по всей длине и равно полу сумме диаметров пряжей, следовательно, синтезирующее уравнение линейного контакта в общем случае запишется в виде:

$$\delta_{12} = \frac{d_1 + d_2}{2},$$

где δ_{12} – расстояние между осями соседних пряжей;
 d_1 и d_2 – диаметры первой и второй пряжи соответственно.

Также отрезок, соединяющий оси пряжей, при линейном контакте перпендикулярен к касательным t_1 и t_2 , проведенным к осям этих пряжей и линии контакта.

Для линейного смежного контакта уравнение запишется в виде[2]:

$$\delta = 2 \cdot r \cdot \varepsilon,$$

где r – радиус цилиндра, на котором расположена ось навиваемой пряжи;
 ε – коэффициент пропорциональности.

Исходя из зависимостей для нахождения внутреннего и наружного диаметров внешнего армирующего слоя и соответствующих преобразований, получим формулу для нахождения диаметра пряжи:

$$\delta_{\Pi} = \frac{\varepsilon \cdot d_{\text{Н}}}{1 + \varepsilon} = \frac{\varepsilon \cdot d_{\text{В}}}{1 - \varepsilon}.$$

Для нахождения параметров собственного тангенциального контакта необходимо задать параметры свивки армирующей пряжи на базовый цилиндр (армированный трубопровод). В качестве параметров необходимо задать: число канатов, угол навивки, наружный диаметр штанговой колонны без защитного полимерного армированного покрытия, либо на основании вышеописанных формул можно решить обратную задачу с известным значением диаметра каната, вместо диаметра штанговой колонны.

После определения радиуса r и диаметра пряжи из условия смежного линейного контакта, находим параметры шага свивки согласно формуле:

$$h = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \operatorname{ctg} \alpha.$$

К параметрам построения конструкции металлополимерной штанговой колонны также относятся и параметры внутреннего армирующего слоя. Одной из задач этого элемента колонны также относятся и параметры внутреннего

армирующего слоя. Одной из задач этого элемента конструкции является сохранение внутреннего диаметра канала полимерной армированной трубы. Для этого примем угол навивки в пределах $(60^\circ; 90^\circ)$ к образующей базового цилиндра. В силу того что параметры свивки внутреннего армирующего слоя и верхнего слоя прядей различны, между ними будет наблюдаться точечное взаимодействие (точечный контакт). К параметрам точечного контакта относятся угол пролета β .

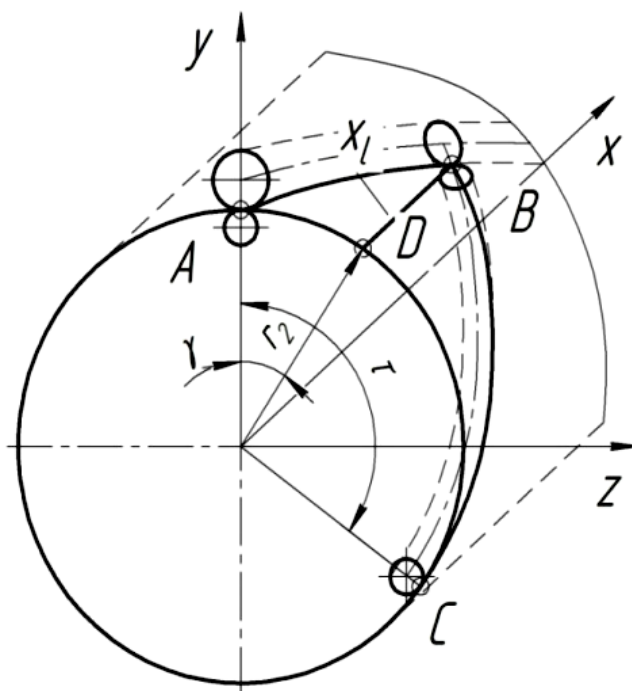


Рисунок 3. Схема контакта внутреннего армировочного слоя с внешним слоем прядей

Через геометрические отношения получаем формулу для определения β :

$$\beta = \frac{2 \frac{\pi}{m_2 \operatorname{tg} \alpha_2}}{\operatorname{ctg} \alpha_1 + \operatorname{ctg} \alpha_2},$$

где α_1 и α_2 – угол повива наружного и внутреннего слоя прядей соответственно,

m_2 – число прядей на внутреннем слое.

Число точек касания 1 – й пряди со 2 – й найдем из выражения:

$$N = \frac{h_1}{h_2},$$

где h_1 и h_2 – шаг повива наружного и внутреннего слоя прядей.

Немаловажную роль в формировании конструкции металлополимерной штанговой колонны играет угол повива прядей, от которого зависят такие параметры как диаметр пряди, модуль упругости и как следствие разрывное усилие всей системы. Проанализировав по формулам зависимости диаметра пряди от угла повива, был получен следующий график:

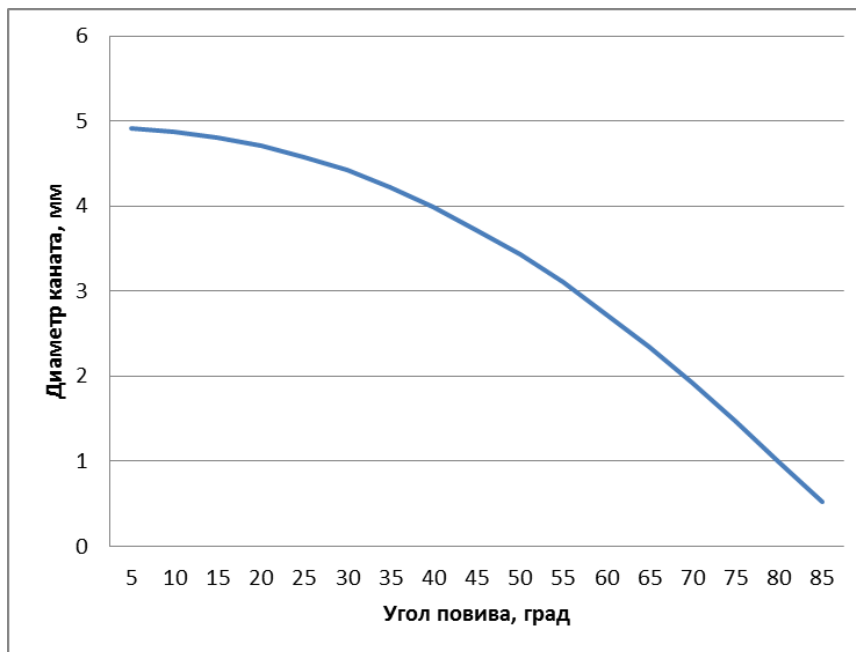


Рисунок 4. Зависимость диаметра пряди от угла повива при числе прядей равным 12

Данный график составлен при следующих условиях:

Диаметр металлополимерной штанговой колонны при всех углах постоянен и равен 24 мм;

Число канатов постоянно и равно в данном примере 12;

Между прядями обеспечивается линейный смежный контакт.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что для наиболее прочной конструкции необходимо принимать углы повива прядей между направляющей базисного цилиндра и касательной к линии повива близкими к нулю (рисунок 1). Это обусловлено тем, что с увеличением угла повива уменьшается диаметр армирующей пряди, что в свою очередь снижает прочность МШК. Следовательно, при формировании конструкции следует руководствоваться рекомендациями, применяемыми для изготовления стальных канатов в которых максимальный угол повива принимают в пределах до 20° к образующей базового цилиндра.

Для проведения прочностных расчетов армирующих элементов необходимо определить параметры штанговой колонны и нагрузки, приходящиеся на места соединения, так как именно они будут определять условия нагружения МКШ.

Конструкция армирующих прядей составляющих композитную штанговую колонну выбирается с учетом назначения и условия работы. При работе пряди в МКШ необходимо, чтобы она обладала достаточной прочностью, жесткостью и устойчивостью к истиранию, для обеспечения нормальной работы скважинного насоса.

В качестве прядей МКШ применяется стальной канат по своей конструкции представляющий металлическое изделие, скрученное в пряди из стальных проволок круглого или фасонного сечения. Пряди свиты вокруг сердечника. От толщины и количества проволок в канате, от марки материала и количества сердечников, от направления, количества и плотности свивок, зависят его конструкция и прочность [2].

Важнейшим техническим свойством канатов является прочность. Она выражается двумя показателями: суммарной прочностью всех проволок, составляющих канат и прочностью каната в целом, называемой агрегатной. И та, и другая характеризуются разрывным усилием, но суммарная прочность больше агрегатной вследствие потери прочности при скручивании проволок в пряди и последних в канат. В проводимых расчетах используется агрегатная прочность [3], которая на 15 – 30% ниже суммарной.

В отличие от обычной насосной штанги по существу представляющей собой металлический стержень, прочностные расчеты МШК затруднены, так как имеет место сложнапряженное состояние и расчет по приведенному допускаемому напряжению будет некорректным. В предложенной методике расчет ведется по максимальной нагрузке на головку балансира станка качалки А.С. Вирновского [1], затем проводится проверочный расчет, с учетом коэффициентов запаса прочности, на разрыв. Так как МШК предполагается компоновать утяжеленным низом, важно подтвердить расчетным путем условие натяжения колонны штанг при ходе вниз. Для этого необходимо провести расчет минимальной нагрузки действующей на головку балансира по формуле А.С. Вирновского.

Конструкция МШК выбирается с учетом известных условий работы в скважине, куда входят глубина спуска насоса и глубина подъема пластовой жидкости, геометрические параметры плунжера насоса, параметры откачиваемой жидкости, производительность скважины и как следствие необходимая частота качаний и длина хода полированного штока с учетом потерь на деформацию колонны штанг. Для разрабатываемой конструкции насосных штанг предполагается использовать длинноходовые, тихоходные станки качалки, чтобы обеспечить плавность хода вниз и хода вверх плунжера насоса.

Сама по себе формула Вирновского А.С. предназначена для расчета стержневых монолитных систем, в случае МШК имеет место сложная составная конструкция, расчет которой по существующим формулам представляется не корректным. Это обусловлено тем, что для составных конструкций необходимо рассчитывать свой модуль упругости, так как имеет место взаимодействие

отдельных прядей между собой при линейном смежном контакте. Так же удлинение свитой конструкции будет значительно больше, чем монолитного стержня, что обусловлено наличием незаполненного пространства, которое обеспечиваем взаимное перемещение элементов МШК, относительно друг друга. Поэтому для того чтобы воспользоваться известными зависимостями необходимо внести соответствующие поправки. Уточним коэффициент статического удлинения колонны под действием веса жидкости[1]:

$$\lambda = \frac{P'_{ж}L}{E_k f_{шт}}$$

где $P'_{ж}$ – вес штанг в жидкости;
 L – длина штанговой колонны;
 E_k – модуль упругости для штанговой колонны;
 $f_{шт}$ – площадь поперечного сечения штанговой колонны.

В данной зависимости модуль упругости штанговой колонны примем исходя из зависимости выведенной Скуратовым Г.И.:

$$E_k = \frac{\sum E \cdot f \cdot \cos^3 \alpha}{\sum \frac{f}{\cos \alpha}}$$

где E – модуль упругости первого рода для материала из которого изготовлена прядь;
 f – площадь поперечного сечения пряди;
 α – угол повива пряди.

В данной формуле модуль упругости зависит от угла повива пряди, исходя из этого, была построена графическая зависимость при условии изменения угла повива, с постоянным числом прядей, равенством их площади поперечного сечения.

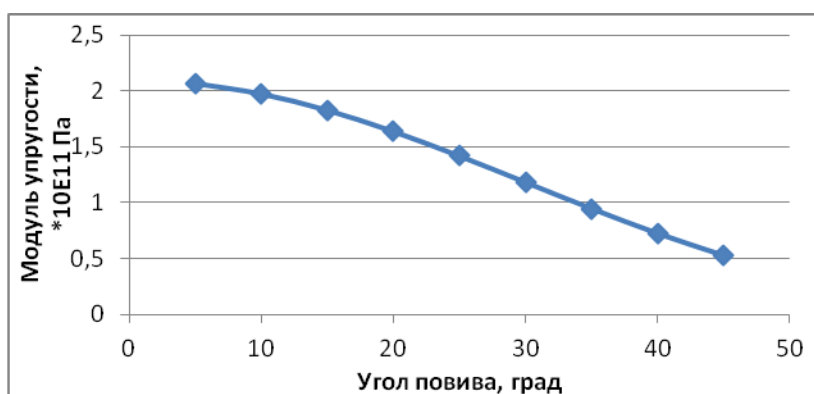


Рисунок 5. Зависимость модуля упругости металлополимерной штанговой колонны от угла повива пряди

Оптимальный модуль упругости обеспечивается при свивки пряди под углом, не превышающим 20° и как следствие прочность штанговой колонны.

Площадь поперечного сечения штанговой колонны в вышеприведенной формуле для МШК будет рассчитываться по следующей зависимости:

$$f_{шт} = \sum f \cdot \cos\alpha,$$

где f – площадь поперечного сечения пряди;

α – угол повива пряди к образующей базового цилиндра.

В расчете учитывается только площади поперечного сечения прядей без учета общей площади поперечного сечения МШК, так как нагрузки воспринимают только армирующие пряди МШК.

По результатам расчета максимальной нагрузки приходящейся на точку подвеса штанг по уточненной формуле А.С. Вирновского при различных углах повива армирующего элемента были построены соответствующие графики.

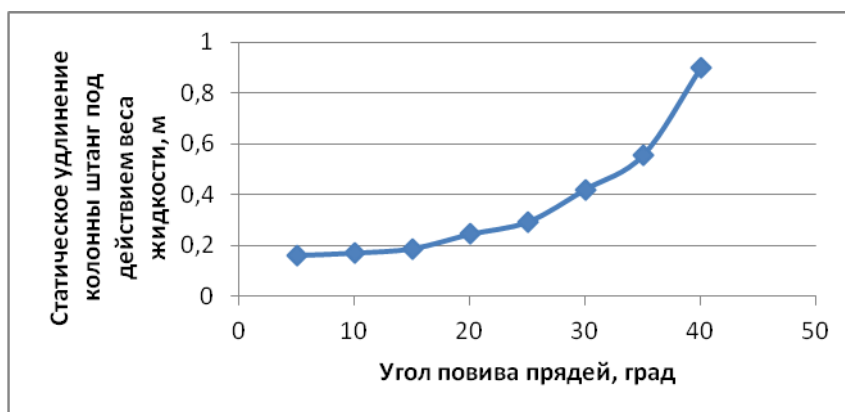


Рисунок 6. Зависимость статического удлинения штанговой колонны под действием веса жидкости от угла повива

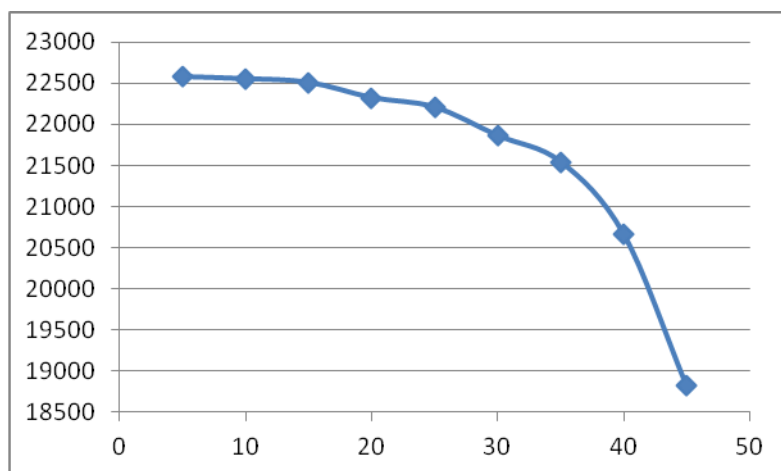


Рисунок 7. Зависимость нагрузки приходящейся на точку подвеса штанг от угла повива прядей

На этих графиках можно наблюдать то, что с увеличением углов повива прядей растет статическое удлинение штанговой колонны под действием веса жидкости и как следствие при приложении растягивающей нагрузки наблюдается большие величины ее удлинения. Так же с ростом удлинения происходит сравнение этой величины с ходом станка качалки, что говорит о невозможности применения конструкций с углами повива превышающими 20° .

В дальнейшем, будут проведены исследования модуля упругости и жесткости МШК при различных условиях на специальном стенде и исходя из этого вноситься коррективы в конструкцию, а также условия эксплуатации этих штанговых колонн. В последующем, исследования будут направлены на повышение жесткостных параметров штанговой колонны, снижение ее статического и динамического удлинения, повышение прочности за счет наличия металлополимерного защитного покрытия.

Выводы

1) На основании зависимости выведенной Глушко М.Ф. [2] и условия линейного контакта смежных прядей в МШК была получена зависимость диаметра пряди от параметров: число прядей, наружный диаметр МШК, угла повива пряди.

2) В результате анализа литературы, с учетом условий эксплуатации и конструкции МШК было уточнено статическое удлинение штанговой колонны под действием веса жидкости входящее в состав формулы А.С. Вирновского.

3) По уточненным формулам были получены зависимости диаметра прядей, модуля упругости и максимальной нагрузки в точке подвеса штанг от угла повива.

Литература

1. Вирновский А.С. Теория и практика глубиннонасосной добычи нефти. М.: Недра, 1971. 185 с.
2. Глушко М.Ф. Стальные грузоподъемные канаты. Киев: Техніка, 1966. 328 с.
3. ГОСТ 3062-80 ЕСКД Канат одинарной свивки типа ЛК-О конструкции 1х7(1+6). М.: ИПК изд-во стандартов, 1996. 8с.
4. Скважинная насосная установка для добычи нефти / Шайдаков В.В., Шайдаков Е.В. и др. пат. № 109509 Рос. Федерация. 20.10.2011. 7 с.
5. Колонна штанговая глубинно-насосной установки/ Шайдаков В.В. и др.: пат. №113542 Рос. Федерация. 20.02.2012. 6с.

References

1. Virnovskiy A.S. Theory and practice well pumping extraction of oil. M.: Nedra, 1971. 185 p. [in Russian].
2. Glushko M.F. Steel hoisting ropes. Kiev: Tehnika, 1966. 328 p. [in Russian].
3. GOST 3062-80 ESKD Single rope, type LK-O construction 1x7 (1+6). M.: ИПК Izd-vostandartov, 1996. 8 p. [in Russian].
4. Downhole pump unit for oil / Shaidakov V.V., Shaidakov E.V., Antonenko A.A., Penzin A.V. Patent № 109509 Russian Federation. 20.10.2011. 7 s. [in Russian].
5. Columnsucker-pumping unit / Shaidakov V.V., Shaidakov E.V., Antonenko A.A., Penzin A.V., Poletaeva O.J. Patent № 113542, Russian Federation 20.02.2012. 6 s. [in Russian].

Сведения об авторах

Антоненко А.А., инженер-конструктор, ООО «ИК» Инкомп-нефть», Уфа, Российская Федерация.

A.A. Antonenko, engineer designer of LLC “Engineering Company” Inkomp-neft”, Ufa, Russian Federation.

Шайдаков В.В., д-р техн. наук, директор ООО «ИК» Инкомп-нефть», V.V. Shaydakov, Ph.D, director of LLC “Engineering Company” Inkomp-neft”, Ufa, Russian Federation.

А.Р. Людвиницкая, канд. техн. наук, научный сотрудник ООО «ИК» Инкомп-нефть», Уфа, Российская Федерация.

A.R. Lyudvinitskaya, Ph.D, research associate of LLC “Engineering Company” Inkomp-neft”, Ufa, Russian Federation.

e-mail: incompneft@yandex.ru