

УДК 621

Ю.А. Коротаев, А.Ю. Пьянков**U.A. Korotaev, A.U. Pyankov**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ МНОГОЗАХОДНОГО ГЕРОТОРНОГО МЕХАНИЗМА МУЛЬТИФАЗНОГО НАСОСА

NEW CONSTRUCTION OF MULTIPLE-START GYRATORY MECHANISM OF MULTIPHASE PUMP

Рассмотрены особенности конструкции, технологии изготовления и эксплуатации многозаходных героторных механизмов винтовых гидромашин. Показано, что одним из основных направлений повышения напорных характеристик и долговечности героторных механизмов мультифазных насосов является армирование зубьев статора. Описана конструкция статора, армированного тонкостенной зубчатой оболочкой и технология формообразования зубчатых оболочек жидкостью высокого давления.

Ключевые слова: многозаходный героторный механизм, насос, армированный статор, ротор, пресс-штамп, пресс-форма, зубчатая оболочка, технология.

Consider features of the construction, production technology, exploitation of the multiple-start gyratory mechanisms of screw hydraulic machines. Shown that one of many directions of methods of improvement pressured features and durability of the multiple-start gyratory mechanisms of multiphase pumps is reinforcement of the stator's teeth. Described reinforced stator's construction and technology of production teeth case.

Keywords: multiple-start gyratory mechanism, pump, reinforced stator, rotor, press, mould, teeth case, technology.

Винтовой насос был изобретен и запатентован французским инженером Рене Муано в 1930 г. Отсутствие клапанов, объемный характер насоса сделали винтовые насосы незаменимыми при перекачке высоковязких растворов, жидкостей с большим содержанием газовой фазы и абразивных частиц [1]. В течение длительного периода времени винтовые насосы претерпевали различные изменения в конструкции привода, уплотнений, длине насосной секции, схем подвода и отвода жидкости. Неизменным оставалось одно – заходность винтовой насосной секции 1:2.

В последние годы широкое распространение получили наземные мультифазные насосные установки для перекачки водно-газо-нефтяных смесей (рис. 1). Мультифазные насосные установки позволяют:

- перекачивать без пульсаций и эмульгирования газожидкостные смеси с содержанием газа до 80 %;
- производить перекачку всей скважинной продукции (нефть, вода, попутный газ) напрямую на установку подготовки и перекачки нефти (УППН), минуя дожимную насосную станцию;
- снизить капитальные и текущие затраты на оборудование для промежуточной перекачки нефти;
- погасить факелы сжигания попутного нефтяного газа и использовать его в технологических целях на УППН;
- снизить давление на устьях скважин, увеличить нефтеотбор и снизить напряженность работы погружных насосов;
- перекачивать вязкие нефти без предварительного подогрева;
- перекачивать нефти с высоким содержанием механических примесей;
- с высокой эффективностью производить закачку водных и водно-газовых смесей в систему поддержания пластового давления в системах адресной закачки в нагнетательные скважины.

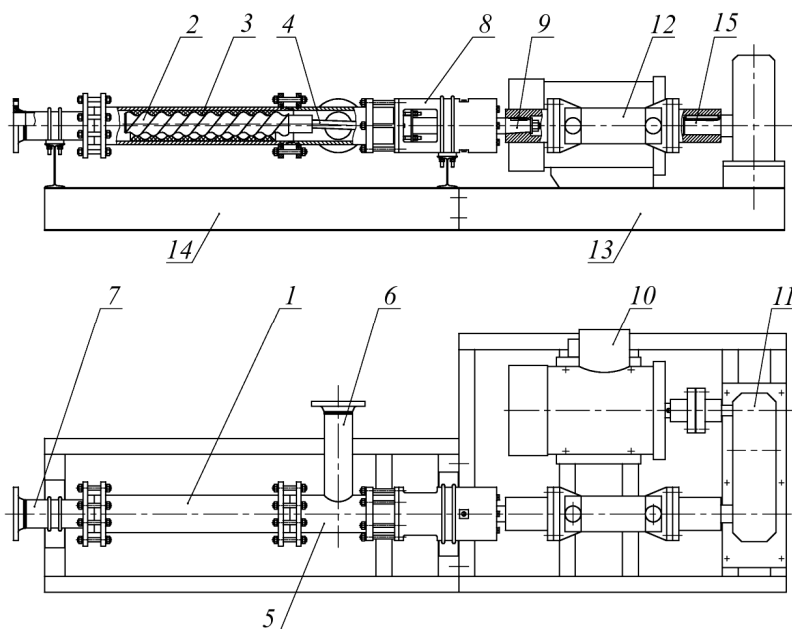


Рис. 1. Общий вид мультифазной насосной установки: 1 – многозаходный героторный механизм; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – шарнирный вал; 5 – корпус-отвод; 6 – всасывающий фланец; 7 – нагнетательный фланец; 8 – шпindel; 9 – вал; 10 – электродвигатель; 11 – редуктор; 12 – карданный вал; 13, 14 – рама; 15 – выходной вал

Основным узлом мультифазного насоса, определяющим его напорные характеристики, является многозаходный винтовой героторный механизм 1 – цилиндрическая планетарная зубчатая передача внутреннего зацепления, состоящая из двух зубчатых элементов, статора 3 и ротора 2, с разницей в числах зубьев, равной единице, и межосевым расстоянием передачи, равным половине высоты зубьев элемента.

Многозаходный героторный механизм был впервые в мире запатентован в 1966 г. во ВНИИБТ и его пермском филиале коллективом авторов под руководством С.С. Никомарова и использовался вначале в винтовых забойных двигателях, используемых для бурения и капитального ремонта нефтяных и газовых скважин. Далее это изобретение было распространено на винтовые секции для насосов. Многозаходные винтовые насосные секции создавались как альтернатива импортным однозаходным, и это неслучайно, ведь при одинаковых габаритах с однозаходными многозаходные насосные секции обладают большим объемом, уменьшенным эксцентриситетом, пониженным межкамерным давлением [1, 2].

Особенностью многозаходных винтовых героторных механизмов является то, что зубья статора выполняются на обкладке из эластомера (резины), привулканизированного к внутренней стенке корпуса статора.

Зубчатая резиновая обкладка статора должна быть твердой и эластичной, обеспечивать хорошую адгезию к металлической арматуре. Материал обкладки статора должен быть устойчив к воздействию щелочей и нефтепродуктов. Перечисленные требования дают основание характеризовать ротор и статор как ответственные детали, не имеющие аналогов в общем и специальном машиностроении. Обеспечение высокого качества изготовления таких уникальных изделий, как многозаходный героторный механизм, представляет собой сложнейшую научно-техническую проблему.

Традиционные конструкции многозаходных винтовых героторных механизмов (отечественных и зарубежных) имеют металлический ротор и резинометаллический статор. Роторы малогабаритных насосов (диаметром до 55 мм) выполняются из круга, в роторах других насосов выполняют отверстие с целью уменьшения массы (рис. 2, а).

Анализ показывает, что статор является наиболее слабой деталью многозаходных героторных механизмов, определяющей срок службы и энергетические характеристики этих механизмов. Основными недостатками резинометаллического статора является разогрев и разрушение резины в процессе работы, а также недостаточная изгибная жесткость зубьев.

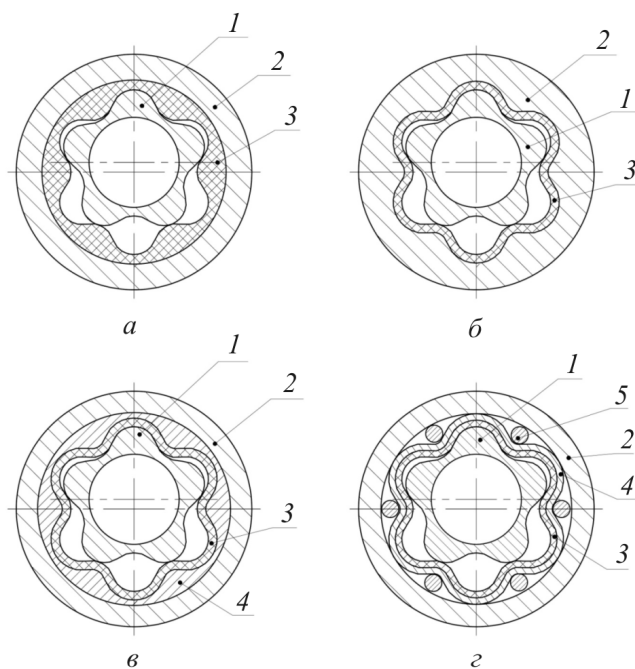


Рис. 2. Торцовое сечение героторных механизмов (а–г – варианты исполнения):
 1 – ротор; 2 – корпус статора; 3 – резиновая обкладка; 4 – вкладыш (литой или кованный), зубчатая тонкостенная оболочка; 5 – пруток

Резиновая обкладка стандартного статора работает при больших контактных и гидростатических давлениях, а также большой частоте нагружения. Из-за больших перепадов давления резиновые зубья статора претерпевают циклические деформации, в результате чего происходит внутренний разогрев резины. При длительном действии циклически изменяющихся во времени напряжений и деформаций начинаются необратимые явления снижения сопротивления материала разрушению, характеризующиеся как усталостное повреждение, образуются микроразрывы, которые на дальнейших стадиях перерастают в макроразрывы либо приводят к окончательному разрушению элемента конструкции [3].

Резина является вязкоэластичным материалом, часть механической энергии деформации преобразуется в тепловую энергию. Тепло аккумулируется в центре резинового зуба статора, как следствие низкой теплопроводности резины и плохого отвода тепла к металлическому остову статора. Генерацию тепла в эластомере под циклическим действием внешних нагрузок H , Дж, можно определить по формуле [4]:

$$H = 2100 \cdot E' \cdot \tan \delta \cdot \varepsilon^2 \cdot v,$$

где E' – модуль упругости, МПа; $\tan \delta$ – отношение модуля вязкости к модулю упругости; ε – деформация; ν – частота нагружения, Гц.

В работе [4] показано, что отвод тепла от обкладки стандартного статора в зоне максимальных деформаций винтового зуба недостаточен. Разогрев резины ухудшает ее физико-механические и упруго-эластичные свойства, приводит к снижению прочности и долговечности. Перегрев резинового зуба статора может привести к термическому разрушению эластомера (рис. 3).



Рис. 3. Разрушение зубьев статора вследствие циклических деформаций

При работе мультифазного насоса крутящий момент от ротора передается на статор. Резиновые зубья статора изгибаются, что приводит к утечке перекачиваемой жидкости и снижению производительности насоса и развиваемого давления.

Снизить уровень контактных нагрузок в зацеплении зубьев статора и ротора, уменьшить интенсивность их износа и предотвратить преждевременное разрушение резиновых зубьев из-за повышенных деформаций и разогрева резины можно за счет увеличения длины зубчатой поверхности героторного механизма. Повышение ресурса за счет увеличения длины героторных механизмов объясняется также возможностью их наработки до больших величин зазоров в зацеплении ротор – статор, до 1 мм и более. Однако чем больше длина зубчатой обкладки статора, тем сложнее технология обрезинивания статора и изготовления героторного механизма.

Повысить энергетические характеристики героторных механизмов, не увеличивая их длину, можно за счет армирования резиновых зубьев статора, которое заключается в изготовлении корпуса статора с внутренними металлическими зубьями с последующим их обрезиниванием. Армирование позволяет увеличить изгибную жесткость резиновых зубьев статора, а также повысить его долговечность за счет лучшего теплоотвода и увеличения усталостной выносливости зубьев.

При увеличенной жесткости винтовой зуб статора значительно меньше перемещается под действием перепада давления промывочной жидкости в рабочих камерах героторного механизма и воздействием ротора, при этом сохраняется контактное взаимодействие рабочих органов. Уменьшаются утечки рабочей жидкости из камер высокого давления в камеры низкого давления. За счет снижения объемных потерь новая конструкция статора позволяет увеличить межвитковый перепад давления промывочной жидкости в рабочих камерах статора при его работе.

При уменьшении объемных потерь в героторном механизме появляется возможность использовать меньший натяг в зацеплении, что должно снизить износ поверхности скольжения ротора и статора, уменьшить механические потери на трение в механизме и повысить его КПД.

Отсутствие или значительное уменьшение протоков промывочной жидкости из рабочих камер двигателя, образованных винтовыми поверхностями ротора и статора, увеличивает производительность насоса и развиваемое давление, другими словами, улучшает напорную характеристику героторного механизма.

Существуют различные способы изготовления корпусов статоров с внутренними винтовыми зубьями:

- электрохимическое выжигание внутренней поверхности заготовки и ковка трубной металлической заготовки на винтовом сердечнике (рис. 3, б);
- литье металла в полость между корпусом и винтовым сердечником, установка в цилиндрический корпус: набора металлических пластин или сегментов с вырезанным профилем, литого или кованого вкладыша с внутренней винтовой поверхностью (рис. 3, в).

Недостатком перечисленных способов является высокая трудоемкость и себестоимость изготовления корпуса статора.

Нами при разработке конструкции героторного механизма мультифазного насоса с армированным статором использована тонкостенная гидроштампованная зубчатая оболочка, которая устанавливается в расточку корпуса статора. В зазор между корпусом статора и поверхностью винтовой оболочки устанавливается жесткий элемент, например пруток (рис. 3, г).

Технология формообразования тонкостенных зубчатых оболочек жидкостью высокого давления (гидроштамповки) была разработана в Пермском филиале ВНИИБТ в начале 1980-х гг. и применялась вначале для изготовления роторов малогабаритных винтовых забойных двигателей Д2-105. По сравнению с традиционной технологией зубофрезерования роторов гидроштамповка имеет следующие преимущества:

- практически полная безотходность процесса, снижение материалоемкости в 4–5 раз;

- кратное повышение производительности труда;
- повышение качества поверхности зубьев ротора.

В конце 2010-х гг. гидроштампованная зубчатая оболочка была впервые использована для армирования статора винтового забойного двигателя Д-95Х. Стендовые испытания двигателей ООО «ВНИИБТ – Буровой инструмент» со статором, армированным тонкостенной стальной винтовой оболочкой, кинематическим соотношением 5:6 и длиной зацепления 2600 мм показали, что новые секции рабочих органов имеют повышенные энергетические характеристики по сравнению с серийными секциями рабочих органов с длиной зацепления 3000 мм, увеличенный на 40 % крутящий момент при режиме максимального КПД, более «жесткую» нагрузочную характеристику работы винтового героторного механизма и увеличение КПД на 10 % при расходе жидкости 10 л/с. Таким образом, повышение энергетических характеристик винтового забойного двигателя (ВЗД) и более жесткая нагрузочная характеристика позволят с большей эффективностью использовать современные моментоемкие долота.

Применение зубчатых оболочек для армирования зубьев резинометаллического статора мультифазного насоса позволяет повысить изгибную жесткость резиновых зубьев статора и улучшить отвод теплоты от зубьев статора, образующейся в результате деформации резины. В новой конструкции многозаходного героторного механизма (рис. 4) зубья статора 1 армированы винтовой тонкостенной металлической оболочкой 2, размещенной внутри резиновой обкладки 3. Для увеличения жесткости тонкостенной оболочки во впадины установлен жесткий элемент 4. Жесткий элемент выполняется из металлических прутков.

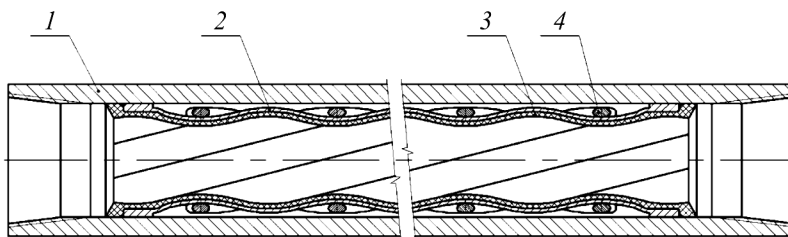


Рис. 4. Статор с армированными зубьями

Стальная зубчатая оболочка изготавливается методом гидроштамповки [5]. Суть способа гидроштамповки состоит в следующем. Внутри тонкостенной цилиндрической трубы (заготовки) 2 помещают профильный винтовой сердечник 1 (рис. 5). Собранную конструкцию (пресс-штамп), герметично уплотненную по торцам, устанавливают в специальную камеру высокого давления. Затем внутрь камеры закачивается жидкость (масло) под большим

давлением. Под действием давления P жидкости цилиндрическая оболочка превращается в винтовую оболочку 3. После сброса давления пресс-штамп извлекают из камеры высокого давления, а затем на специальном прессе вытягивают сердечник из оболочки.

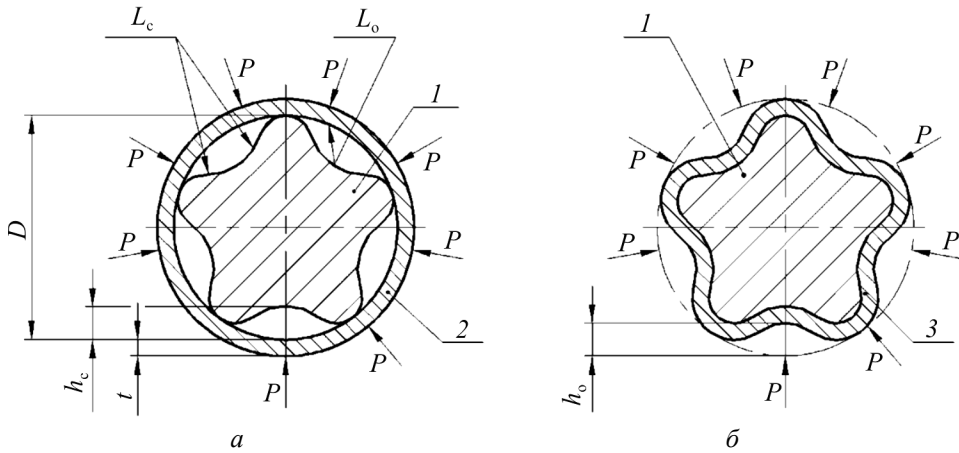


Рис. 5. Торцовое сечение оболочки и сердечника пресс-штампа:
а – до формообразования; б – после формообразования

Камера высокого давления и ее резьбы при проектировании рассчитываются на прочность. Корпус камеры подвергается расчету на действие внутреннего давления до 300 МПа, а резьбы рассчитываются на выдерживание осевой силы, возникающей как результат действия внутреннего давления. Эти силы могут достигать 2000 кН.

Извлечение сердечника из оболочки осуществляется на специальном прессе. Сердечник с отштампованной заготовкой устанавливается на станину прессы. Заготовка через опорное кольцо упирается в основание прессы, а сердечник вытягивается из оболочки при помощи гидроцилиндра. Усилие вытяжки составляет от 200 до 1000 кН, в зависимости от типоразмера и длины заготовки.

Для облегчения извлечения сердечника из оболочки, а также для увеличения срока его службы применяется технологическая водорастворимая смазка «Синерс-МФ» производства ФГУП «НИИполимеров». Эта смазка обладает повышенными противозадирными свойствами и легко смывается водой, оставляя поверхности сердечника и заготовки чистыми. Опыт применения смазки «Синерс-МФ» показал, что ее использование значительно снижает износ сердечника пресс-штампа, в отличие от применения консистентных нефтеполимерных смазок.

Для повышения износостойкости и уменьшения контактного износа поверхность сердечника упрочняется ионным азотированием, что обеспечивает

твердость поверхности сердечника 900–1000 HV. Для облегчения разборки пресс-штампа профильный сердечник изготавливается с небольшим конусом.

Для формования зубчатых оболочек используются стали, которые хорошо поддаются штамповке. Для гидроштамповки зубчатых оболочек армированных статоров применяются стали 10, 15, 20, у которых величина относительного удлинения составляет 25–30 %, а для гидроштамповки зубчатых оболочек облегченных роторов применяется жаропрочная нержавеющая сталь 12X18H10T, относительное удлинение которой достигает 50 %.

Винтовая оболочка крепится внутри корпуса статора при помощи сварки. Сварка осуществляется специальными электродами и на особых режимах, не приводящих к появлению трещин в корпусе статора. Наличие трещин в корпусе статора после сварки не допускается. Сварной шов рассчитан на выдерживание момента вала двигателя как минимум с двойным запасом прочности. Крепление оболочки в корпусе статора может также осуществляться при помощи конусных втулок, распирающих оболочку в корпусе. Перед установкой винтовой оболочки в корпус статора во впадины оболочки устанавливается жесткий элемент, препятствующий деформации зубьев во время работы двигателя.

Заливка армированного статора резиновой смесью осуществляется на специальной пресс-форме. Пресс-форма устроена таким образом, чтобы обеспечивать правильную ориентацию профилей зубьев статора и пресс-формы с целью обеспечения равномерной толщины резины по профилю зубьев оболочки армированного статора (рис. 6).

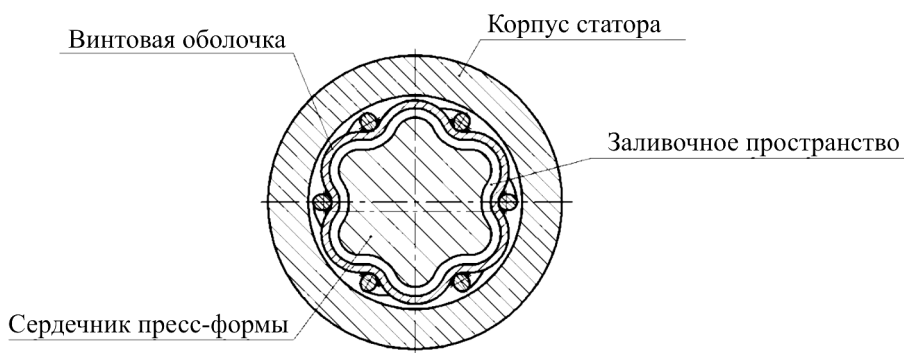


Рис. 6. Установка пресс-формы в корпусе статора

Внутренняя поверхность оболочки перед заливкой проходит стадии очистки, обезжиривания и нанесения клеевого состава. Перед нанесением клея поверхность оболочки подвергается дробеструйной обработке. Внутренняя поверхность оболочки имеет сложную винтовую форму, применяется специальная технология по обработке дробью.

Зазор между сердечником пресс-формы и винтовой оболочкой (заливочное пространство) определяет толщину резиновой обкладки статора. С уменьшением толщины резиновой обкладки статора жесткость зубьев повышается и, как следствие, увеличивается тормозной момент двигателя и мощность. Однако чем меньше толщина обкладки, тем сложнее обеспечить заливку статора резиновой смесью. Кроме того, толщина обкладки должна обеспечить максимальную долговечность рабочей пары ВЗД. Как показала практика, оптимальная толщина резиновой обкладки находится в пределах 0,3–0,6 высоты зубьев статора.

Проектирование сердечника пресс-формы статора осуществляется с учетом толщины резиновой обкладки, а также усадки резины при вулканизации. Толщина резиновой обкладки армированного статора значительно меньше толщины резиновой обкладки стандартного статора, поэтому резиновая смесь должна обладать повышенными литьевыми свойствами и износостойкостью. В современных армированных статорах применяются резиновые смеси отечественного и импортного производства, обладающие требуемыми свойствами.

Сборка корпуса статора с пресс-формой осуществляется по следующей технологии. После подготовительных операций (обезжиривание, дробеструйная обработка, нанесение клея) корпус статора 1 устанавливается на монтажный стол (рис. 7). С помощью направляющих приспособлений 2 сердечник пресс-формы 3 вводится внутрь корпуса статора. Благодаря направляющим приспособлениям, выполненным, например, в виде роликов, сердечник пресс-формы вводится внутрь корпуса статора с вращением. Такая конструкция предохраняет винтовую поверхность сердечника от соприкосновения с оболочкой, защищая сердечник от переноса клеевого раствора с оболочки.

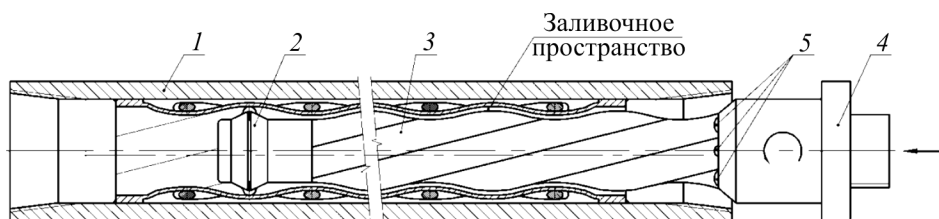


Рис. 7. Установка пресс-формы в статор

После монтажа пресс-форма фиксируется в корпусе статора во избежание поворота сердечника относительно оболочки во время заливки. Далее собранная конструкция направляется на литевой пресс, в котором происходит заливка статора резиной [5]. Резина из прессы поступает в заливочную головку 4 пресс-формы, а затем через заливочные отверстия 5 заполняет заливочное пространство. После заливки статор помещается в автоклав для вулканизации резины. Затем пресс-форма извлекается из статора на специальном прессе.

В настоящее время разработана конструкторская документация на героторный механизм мультифазного насоса размером 240 мм со статором, армированным зубчатой оболочкой, а также технология его изготовления, оборудование и технологическая оснастка. Внедрение нового героторного механизма позволит повысить напорные характеристики насоса на 50–60 %.

Список литературы

1. Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д., Гноевых А.Н. Одновинтовые гидравлические машины: 2 т. Т. 2. Винтовые забойные двигатели. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. – 858 с.
2. Коротаяев Ю.А., Чудаков Г.Ф., Николаев В.Ю. Винтовые насосные секции и насосные установки Пермского филиала ВНИИБТ // Строительство нефтяных скважин на суше и на море. – 2003. – № 9.
3. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов / под. ред. Г.С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.
4. Плотников В.М., Фуфачев О.И. Тепловой расчет резиновой обкладки статоров винтовых забойных двигателей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 9. – С. 3–6.
5. Голдобин Д.А., Коротаяев Ю.А. Особенности конструкции и технологии изготовления статоров винтовых забойных двигателей ООО «ВНИИБТ – Буровой инструмент», армированных стальной тонкостенной винтовой оболочкой // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 11.

Получено 10.04.2015

Коротаяев Юрий Арсеньевич – профессор, ПНИПУ, МТФ, e-mail: ykor1946@yandex.ru.

Пьянков Александр Юрьевич – магистр, ПНИПУ, МТФ, гр. ТОК-13м, e-mail: al.u.pyankov@mail.ru.