

УДК 622.276.054

**А.В. Булат<sup>1</sup>**, e-mail: [avbulat87@gmail.com](mailto:avbulat87@gmail.com); **С.А. Карелина<sup>1</sup>**, e-mail: [Karelina2007@yandex.ru](mailto:Karelina2007@yandex.ru);  
**В.Н. Ивановский<sup>2</sup>**, e-mail: [ivanovskiyvn@yandex.ru](mailto:ivanovskiyvn@yandex.ru); **М.Г. Блохина<sup>1</sup>**, e-mail: [m.blozhina@gubkin.ru](mailto:m.blozhina@gubkin.ru);  
**И.С. Пятов<sup>2</sup>**, e-mail: [reamrti@mail.ru](mailto:reamrti@mail.ru); **Л.В. Воробьева<sup>2</sup>**, e-mail: [reamrti@mail.ru](mailto:reamrti@mail.ru);  
**Ю.В. Кирпичев<sup>2</sup>**, e-mail: [kirpichev@ream-rti.ru](mailto:kirpichev@ream-rti.ru); **В.Г. Тимошенко<sup>2</sup>**, e-mail: [vti\\_09@mail.ru](mailto:vti_09@mail.ru)

<sup>1</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (Москва, Россия).  
<sup>2</sup> ООО «РЕАМ-РТИ» (Московская обл., Россия).

## Рациональные области применения различных видов оборудования для защиты от механических примесей

Современные технологии добычи нефти требуют значительных депрессий на пласт, что приводит к повышению содержания в пластовом флюиде механических примесей, негативно влияющих на работу скважинного оборудования. Кроме того, наличие механических примесей существенно снижает эффективность работы системы поддержания пластового давления, а также увеличивает расход химических реагентов и потребляемой энергии.

Для защиты от негативного влияния механических примесей применяются сепараторы и фильтрэлементы. Опыт практического применения показывает, что сепараторы инерционного типа хорошо работают при значительных расходах жидкости и размерах механических примесей более 20–50 мкм, тогда как фильтрэлементы могут обеспечить тонкость фильтрации до 2–5 мкм, однако быстро засоряются и теряют проницаемость, особенно при наличии в очищаемой жидкости механических примесей и вязкой составляющей нефти.

В целом анализ возможностей применения оборудования для защиты от негативного влияния механических примесей показал, что для скважинных насосных установок наилучшим вариантом будет сепаратор, а для оборудования подготовки воды для системы поддержания пластового давления – комбинация из сепаратора механических примесей (первая ступень очистки) и фильтрэлементов на основе проволочных проницаемых материалов (вторая ступень очистки).

Отмечена также перспективность применения технологий обработки поверхности фильтрующих структур гидро- и олеофобными покрытиями на основе фтор- и кремнийорганических материалов, способными препятствовать адгезии к поверхности фильтрующих структур продукции пласта, в целях повышения эксплуатационной работоспособности скважинных фильтров.

**Ключевые слова:** механические примеси, сепаратор, фильтр, проволочный проницаемый материал, поддержание пластового давления, размер гранул механических примесей.

.....  
**A.V. Bulat<sup>1</sup>**, e-mail: [avbulat87@gmail.com](mailto:avbulat87@gmail.com); **S.A. Karelina<sup>1</sup>**, e-mail: [Karelina2007@yandex.ru](mailto:Karelina2007@yandex.ru);  
**V.N. Ivanovskiy<sup>2</sup>**, e-mail: [ivanovskiyvn@yandex.ru](mailto:ivanovskiyvn@yandex.ru); **M.G. Blokhina<sup>1</sup>**, e-mail: [m.blozhina@gubkin.ru](mailto:m.blozhina@gubkin.ru);  
**I.S. Pyatov<sup>2</sup>**, e-mail: [reamrti@mail.ru](mailto:reamrti@mail.ru); **L.V. Vorobyeva<sup>2</sup>**, e-mail: [reamrti@mail.ru](mailto:reamrti@mail.ru);  
**Yu.V. Kirpichov<sup>2</sup>**, e-mail: [kirpichev@ream-rti.ru](mailto:kirpichev@ream-rti.ru); **V.G. Timoschenko<sup>2</sup>**, e-mail: [vti\\_09@mail.ru](mailto:vti_09@mail.ru)

<sup>1</sup> Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education "Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)" (Moscow, Russia).

<sup>2</sup> REAM-RTI LLC (Moscow Region, Russia).

## Rational Applications of Various Types of Equipment for Protection from Mechanical Impurities

Modern oil production technologies require significant depressions on the reservoirs, which leads to an increase in the content of mechanical impurities in the reservoir fluid. The presence of mechanical impurities negatively affects the operation of well equipment and significantly reduces the efficiency of the reservoir pressure maintenance system, and also increases the consumption of chemical reagents and energy.

Separators and filter elements are used to protect against the negative influence of mechanical impurities. Experience shows that inertial separators work well at significant fluid flow rates and sizes of mechanical impurities more than

20–50 microns, while filter elements can provide filtration fineness up to 2–5 microns, but they quickly become clogged and lose permeability, especially in the presence of mechanical impurities and a viscous components of oil in the fluid that to be purified.

In general, an analysis of the possibilities of using equipment to protect against the negative influence of mechanical impurities showed that the best option for downhole pumping units would be a separator, and for water treatment equipment for a reservoir pressure maintenance system the top choice is a combination of a mechanical impurity separator (first stage of purification) and filter elements based on wire permeable materials (second stage of cleaning).

It is also noted that it is promising to use technologies for treating the surface of filter structures with hydro- and oleophobic coatings based on fluorine and organosilicon materials, which can prevent adhesion to the surface of filtering structures of reservoir products, in order to increase the operational efficiency of downhole filters.

**Keywords:** mechanical impurities, separator, filter, wire-permeable material, maintenance of reservoir pressure, size of granules of mechanical impurities.

Добыча нефти в России в 2019 г. достигла нового максимума за весь постсоветский период и составила около 554 млн т (рис. 1). По итогам года Россия заняла 2-е место в мире по добыче нефти после Саудовской Аравии. Помехой не стало даже действующее с декабря 2016 г. соглашение об ограничении производства «черного золота» в рамках договоренности ОПЕК+.

В то же время количество скважин, дающих продукцию и оборудованных

установками электроприводных лопастных насосов (УЭЛН), за 11 лет выросло на 55 %. При этом количество скважин, оборудованных штанговыми скважинными насосными установками (ШСНУ), сократилось на 20 %. И если 10 лет назад УЭЛН занимали 51 % всего фонда нефтяных скважин, то сейчас эта цифра выросла до 67 % [2].

В современных условиях добычи нефти все чаще приходится сталкиваться с факторами, осложняющими работу

скважинного оборудования, к которым в первую очередь относятся коррозионная агрессивность, механические примеси, газовый фактор, вязкость, наличие асфальтостомолапаррафиновых отложений (АСПО) и сочетание указанных осложнений. Все эти факторы приводят к сокращению ремонтного периода оборудования (МРП), средней наработки до отказа (СДО) и, соответственно, к простоям скважин.

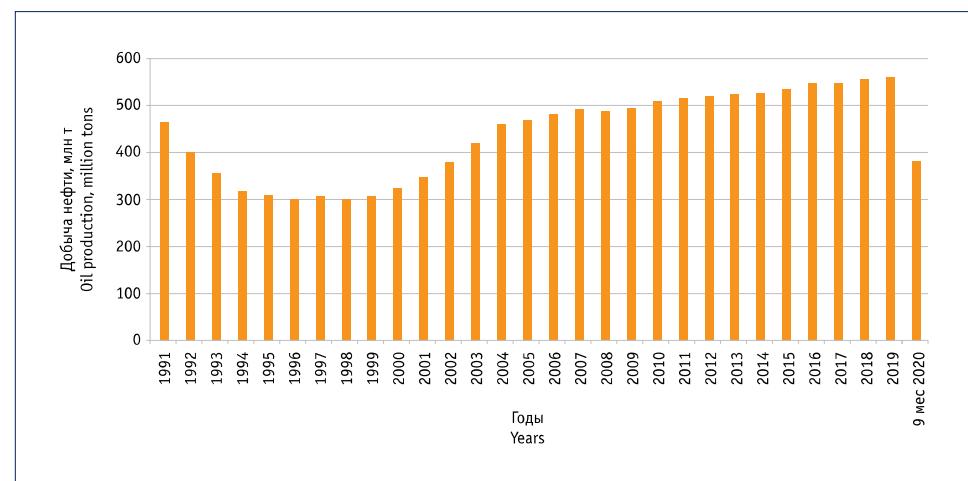


Рис. 1. Добыча нефти с газовым конденсатом в России в 1991–2020 гг. [1]

Fig. 1. Oil production with gas condensate in Russia in 1991–2020 [1]

Ссылка для цитирования (for citation):

Булат А.В., Карелина С.А., Ивановский В.Н., Блохина М.Г., Пятов И.С., Воробьева Л.В., Кирпичев Ю.В., Тимошенко В.Г. Рациональные области применения различных видов оборудования для защиты от механических примесей // ТERRITORIJA «НЕФТЕГАЗ». 2020. № 9–10. С. 52–63.

Bulat A.V., Karelina S.A., Ivanovskiy V.N., Blokhina M.G., Pyatov I.S., Vorob'yeva L.V., Kirpichev Yu.V., Timoschenko V.G. Rational Applications of Various Types of Equipment for Protection from Mechanical Impurities. TERRITORIJA «NEFTEGAS» [Oil and Gas Territory]. 2020;(9–10):52–63. (In Russ.)

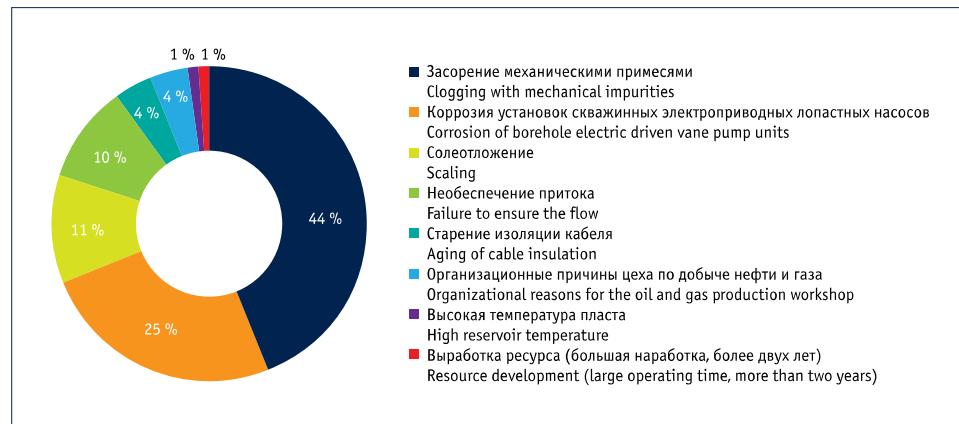


Рис. 2. Причины преждевременных отказов установок скважинных электроприводных лопастных насосов на одном из месторождений Западной Сибири

Fig. 2. Reasons for premature failures of borehole electric driven vane pump units at one of the fields in Western Siberia

### ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ КАК ОДИН ИЗ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ СНИЖЕНИЯ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА

Анализ показывает, что одним из главных факторов снижения наработки до отказа является наличие механических примесей или пескоструйное действие. А поскольку нефтяные компании повсеместно проводят комплексы работ по интенсификации добычи нефти, эта проблема становится еще более острой. Проведение комплекса работ по увеличению депрессии на пласт и гидравлическому разрыву пласта (ГРП) обуславливает увеличение концентрации взвешенных частиц (КВЧ) в откачиваемом флюиде, что негативно сказывается на работе подземного оборудования.

Пример распределения удельного веса причин преждевременного отказа оборудования на одном из месторождений Западной Сибири представлен на рис. 2. Из рисунка видно, что наибольшее число отказов при эксплуатации УЭЛН происходит из-за влияния механических примесей. Это обусловлено тем, что механические примеси по своим размерам, составу и твердости разнообразны и оказывают негативное влияние на работу всего оборудования.

Основными составляющими механических примесей при добыче нефти являются:

- породообразующие компоненты;
- продукты коррозии металла оборудования;
- незакрепившийся проппант;
- твердые вещества, образующиеся в результате химических реакций взаимодействия перекачиваемых жидкостей;
- различные включения, попадающие в скважину в процессе строительства, монтажа оборудования и ремонтных работ;
- соли, выпадающие из пластового флюида из-за изменения термобарических условий.

Негативное влияние механических примесей на нефтегазовое оборудование можно разделить на следующие:

- истирание рабочих органов электротрекцентробежных насосов (ЭЦН) абразивными частицами после ГРП или частицами горных пород, происходящее вследствие того, что твердость частиц может превышать твердость материала элементов насоса в 5–10 раз;
- отложение механических примесей и солей на рабочих органах насоса;
- загрязнение скважинного оборудования, попадание в проточные каналы насосов механических примесей, солей, окалины;
- засорение, заклинивание и износ обратного клапана;
- самопроизвольное расщепление (РС-отказы) по длине скважинного насосного оборудования. РС-отказы могут происходить в соединениях ЭЦН и погружного электродвигателя (ПЭД), соединении ЭЦН с колонной насосно-компрессорных труб (НКТ) или собственно в колонне НКТ. Наиболее часто РС-отказы связаны с возникновением повышенной вибрации при работе оборудования, вызванной износом рабочих элементов и отложением солей.

Анализ таких отказов за счет негативного влияния механических примесей приведен в работах [3–6].

При этом все исследователи сходятся во мнении, что мелкие (до 20–50 мкм) механические примеси не являются главной причиной отказов скважинных насосных установок. Действительно, указанные размеры меньше толщины слоя пластового флюида, который за счет сил поверхностного натяжения образуется на поверхности скважинного оборудования и существенно меньше, чем номинальный зазор между подвижными и неподвижными деталями насосных установок. В связи с этим истирание или абразивный износ будут маловероятны. Малая масса указанных частиц не позволяет также говорить

Таблица 1. Допустимое содержание механических примесей и нефти в закачиваемой в продуктивный коллектор воде с целью поддержания пластового давления [8]

Table 1. Permissible content of mechanical impurities and oil in the water injected into the productive reservoir in order to maintain reservoir pressure [8]

Проницаемость пористой среды коллектора, мкм <sup>2</sup> Permeability of the reservoir porous medium, $\mu\text{m}^2$	Коэффициент относительной трещиноватости коллектора Reservoir relative fracturing coefficient	Допустимое содержание в воде, мг/л Permissible content in water, mg/l	Механических примесей Mechanical impurities	Нефти Oil
≤ 0,1	–	< 3	< 5	< 10
> 0,1	–	< 5	< 15	< 15
≤ 0,35	6,5 < 2,0	< 15	< 30	< 30
> 0,35	< 2,0	< 30	< 40	< 40
≤ 0,6	3,5 < 3,6	< 40	< 50	< 50
> 0,6	< 3,6	< 50		

о способности их оказывать влияние на интенсивность гидроабразивного износа рабочих поверхностей насосного оборудования.

Наличие механических примесей является проблемой не только при добыче нефти, но и при поддержании пластового давления (ППД). Низкое качество воды может существенно увеличить затраты на ППД и привести к возникновению технологических проблем, таких как рост числа подземных ремонтов, операций по очистке призабойной зоны, энергозатрат на ППД. В процессе вытеснения нефти при ППД сегодня применяется большое количество различных химических реагентов, чувствительных к наличию механических примесей и остаточной нефти в закачиваемой систему ППД воде. Поэтому наличие механических примесей и остаточной нефти требует кратного увеличения концентрации химреагентов, закачиваемых в пласт в целях увеличения нефтеотдачи.

Как было сказано, наличие механических примесей приводит к ухудшению проницаемости призабойной зоны нагнетательных скважин. Так, необходимость решения этой проблемы на одном кусте из 16 нагнетательных скважин с темпами закачки до 150 м<sup>3</sup>/сут и давлениями нагнетания до 20 МПа требует увеличения затрат энергии на 1,5 млн кВт·ч в год [7].

Для решения проблемы негативного воздействия механических примесей при интенсивных отборах нефти и в системах ППД следует применять различные системы очистки пластовой

или технологической жидкости от механических примесей, конструкция и принципы действия которых зависят от условий эксплуатации.

КВЧ, или объемное содержание механических примесей (СМП), для добывающего оборудования ограничивается техническими и технологическими возможностями выноса этих примесей потоком жидкости на поверхность земли и способностью сопротивляться износу самого оборудования.

Для жидкости, нагнетаемой в пласт, количество механических примесей ограничено уровнем износостойкости оборудования системы ППД, а также коллекторскими свойствами пластов и данными порометрии: толщины пластины, проницаемости коллектора и пористости. От этих свойств зависят допустимое значение содержания твердых взвешенных частиц (ТВЧ) в мг/л и максимально допустимые размеры частиц в мкм. В зависимости от свойств пластов, принимающих жидкость для ППД, содержание ТВЧ варьируется от 5 до 75 мг/л, а допускаемый размер частиц – от 0,35 до 3,9 мкм (табл. 1, рис. 3).

Превышение установленных паспортными характеристиками пределов размеров, твердости и концентрации механических примесей приводит к резкому увеличению интенсивности абразивного износа движущихся деталей насосов в местах их сопряжения с неподвижными деталями, износу дополнительного оборудования (газосепараторов, компрессионных насадок), засорению приемной сетки насоса и проходных

сечений в насосе, осаждению механических примесей в каналах ступеней лопастных насосов, гидроабразивному износу рабочих органов и проточных каналов. Предел КВЧ для типового ЭЛН обычного исполнения составляет 100 мг/л, для износостойких ЭЛН – от 500 до 1000 мг/л.

До недавнего времени для очистки воды от механических примесей на многих объектах нефтяных компаний применялись дорогостоящие крупногабаритные очистные комплексы сложного технологического оборудования. К сожалению, существующие фильтрующие элементы, используемые в данных системах, быстро загрязняются и требуют либо промывки, либо замены. В связи с этим для того, чтобы обеспечить выполнение требований, установленных стандартами нефтедобывающих компаний в части количества и грануллярного состава механических примесей, необходимо оптимизировать системы подготовки воды. Аналогичные задачи стоят перед разработчиками оборудования для защиты скважинных насосных установок от негативного воздействия механических примесей.

В данной статье представлен результат анализа существующих методов борьбы с механическими примесями и определены основные области их применения.

### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА МЕТОДОВ БОРЬБЫ С МЕХАНИЧЕСКИМИ ПРИМЕСЯМИ

Для обеспечения защиты оборудования от попадания механических примесей применяются специальные сепараторы

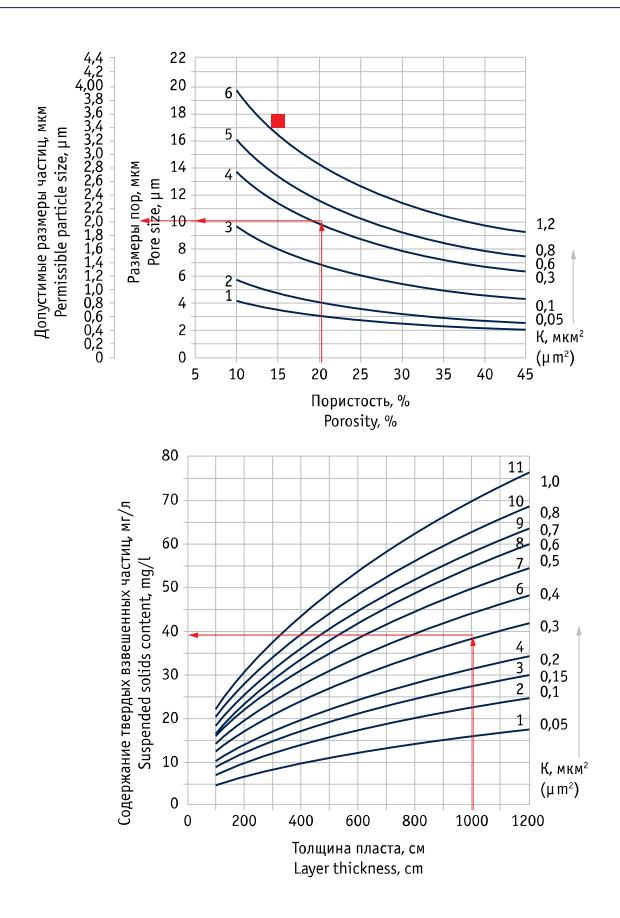


Рис. 3. Определение основных требований к качеству воды по [8]  
Fig. 3. Determining the main requirements for water quality by [8]

(песчаные якоря), фильтрующие системы и устройства, в которых имеется сочетание этих систем.

#### Сепараторы

Сепараторы механических примесей (песчаные якоря) применяются для работы в составе скважинных насосных установок и в наземном оборудовании для подготовки воды давно и успешно [3]. Сепараторы используют два основных принципа отделения

механических примесей – гравитационный и инерционный. Первый принцип используется при малых расходах жидкости и требует, как правило, значительных объемов сепарационного устройства. Инерционные сепараторы предназначены для отделения примесей при высоких значениях расхода и имеют сравнительно небольшие размеры. Для повышения тонкости очистки инерционных сепараторов в их состав включают конический ци-

клон. Такие сепараторы называются гидроциклонными.

Применение сепараторов механических примесей (без дальнейшего использования резервуаров-отстойников) не позволяет обеспечить отделение из потоков воды или пластового флюида примесей с размерами менее 10–20 мкм. Такая тонкость очистки может считаться удовлетворительной для скважинных насосных установок [3], но совершенно неприемлема для большинства пластов, в которых необходимо использовать заводные для ППД.

Специалистами кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина и ООО «РЕАМ РТИ» была предложена модульная конструкция установки системы подготовки воды (СПВ) для обеспечения требований качества воды системы ППД (рис. 4) [9]. В зависимости от предъявляемых требований установка включает в себя одну или две ступени очистки. Требуемая пропускная способность достигается увеличением диаметра корпуса ступеней и их количества.

#### Фильтры

Другим вариантом ограничения попадания механических примесей в оборудование или пласт является применение специальных фильтров. Фильтры применяются как в скважинных насосных установках, так и в системах подготовки воды для ППД. На сегодняшний день известно большое количество различных фильтров.

Так, в [10] описан фильтр ЖНШ, в котором в качестве фильтрующего элемента используются щелевые решетки Джонсона (Johnson screen) из V-образной проволоки из высокопрочной нержавеющей стали (рис. 5). Фильтр работает в составе УЭЦН. Размер задерживаемых частиц – 0,1–0,2 мм. Недостатком данной конструкции является то, что фильтр увеличивает общую длину УЭЦН, применяется только с газосепаратором без входного модуля, зависит от габарита погружной установки и имеет достаточно высокую стоимость. Области применения фильтра ограничиваются определенной максимальной нагрузкой на вал.

Достаточно часто (при наличии в добываемой жидкости глины и прочих подобных субстанций) происходит засорение поверхности фильтра. Имеется и еще один недостаток: крупные частицы механических примесей «отбиваются» фильтром с V-образной проволокой и выпадают на забой. Фильтр ЖНШ и щелевые фильтры обладают схожей конструкцией, преимуществами и недостатками. Общими недостатками щелевых фильтров являются снижение производительности скважин, обусловленное образованием непроницаемого массива между фильтром и стенкой скважины, сложность извлечения фильтров на поверхность, а также разрушение фильтрующей структуры под действием сероводородного коррозионного растрескивания под напряжением [11] в местах сварки (рис. 5в).

Металлокерамические фильтры, получаемые методом порошковой металлургии, обладают способностью задерживать твердые частицы любого заданного размера (рис. 6). Однако фильтры с пористой средой подвержены колматации глинистыми частицами при спуске в скважину и в период эксплуатации, создают значительные гидравлические сопротивления и выдерживают незначительные перепады давления (0,8–2,0 МПа) [10].

Шламоуловитель МВФ, также описанный в [10], представляет собой многослойный фильтроэлемент из пеноникеля, задерживающий частицы диаметром более 0,25 мм (рис. 7). Пористость достигает 99 %. Входной модуль шламо-



Рис. 4. Общий вид установки системы подготовки воды для подготовки воды системы поддержания пластового давления  
Fig. 4. General view of the unit of a water treatment system for water treatment of a reservoir pressure maintenance system

уловителя оборудован клапаном, срабатывающим при засорении фильтра. Фильтр работает в составе УЭЦН. К недостаткам можно отнести то, что механические примеси и пропellant остаются в фильтре, а кроме того, фильтр увеличивает общую длину УЭЦН и может применяться только с газосепаратором без входного модуля.

В случае шламоуловителей МВФ также существует ограничение по передаваемой валом мощности: для габарита 5 это 85 кВт, для габарита 5А – 140 кВт. При этом максимальный расход для габарита 5–125 м<sup>3</sup>/сут, для габарита 5А – 280 м<sup>3</sup>/сут. К недостаткам также можно отнести сложный и дорогостоящий ремонт данного шламоуловителя.

Шламоуловитель ШУМ 5Д включает в себя диспергирующие ступени и направляющий аппарат (НА) с удлиненной ступицей, ступени УЭЦН. При прохождении диспергирующих ступеней происходит подготовка однородной суспензии, далее жидкость проходит пакет ступеней НА с удлиненной ступицей, в которых между наружной поверхностью ступицы и внутренней поверхностью стеки НА осаждаются механические примеси. К числу недостатков шламоуловителя данного типа относятся увеличение общей длины УЭЦН, а также то, что при высоком уровне КВЧ фильтр шламоуловителя быстро забивается. Параметры фильтра зависят от габарита

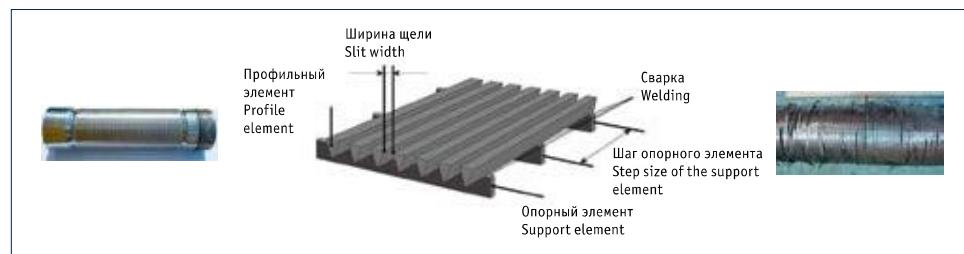


Рис. 5. Щелевой фильтр: а) общий вид; б) щелевая фильтрующая структура; в) разрушение фильтрующей щелевой структуры под действием сероводородного коррозионного растрескивания под напряжением  
Fig. 5. Slot filter: a) general view; b) slot filter structure; c) destruction of the slot filter structure under the hydrogen sulfide stress corrosion cracking



Рис. 6. Металлокерамический фильтр  
Fig. 6. Metalceramic filter

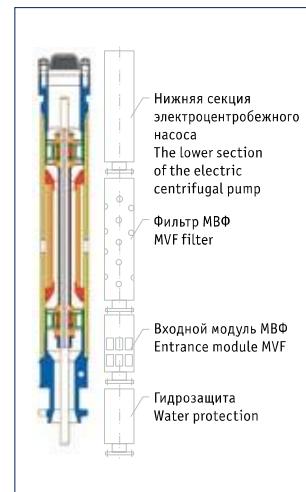


Рис. 7. Шламоуловитель MVF [10]  
Fig. 7. Sludge collector MVF [10]

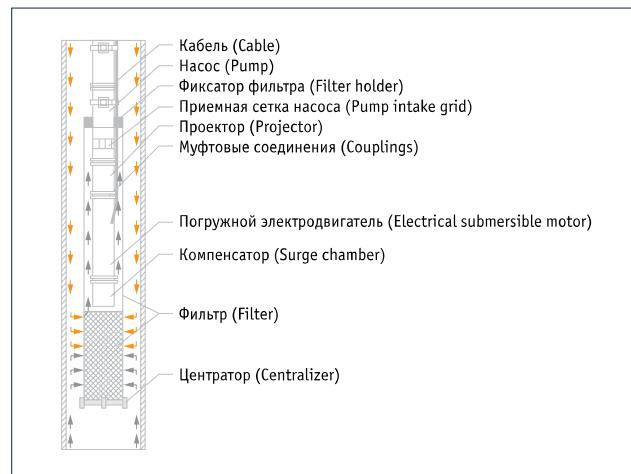


Рис. 8. Скважинный фильтр-коуж для установки электроцентробежного насоса [10]  
 Fig. 8. Downhole filter casing for an electric centrifugal pump unit [10]

УЭЦН. Существует проблема по передаче мощности через вал: известны случаи скручивания шлицев и слома вала. Кроме того, зафиксированы случаи истончения стенки и слома ступицы аппарата при высоком уровне КВЧ. Имеется ограничение по пропускной способности: габарит  $5-125 \text{ м}^3/\text{сут}$ , габарит  $5\text{A} - 200 \text{ м}^3/\text{сут}$ . *Скважинный фильтр-коуж для УЭЦН* [10] выполнен в виде кожуха (труба диаметром 130 мм с нижней перфорированной частью), который распространяется только на длину установки УЭЦН.

способности: габарит 5–125 м<sup>3</sup>/сут, габарит 5А – 200 м<sup>3</sup>/сут. Скважинный фильтр-коуж для УЭЦН [10] выполнен в виде коужа (труба диаметром 130 мм с нижней перфорированной частью), который распространяется только на длину установки УЭЦН.

На одном конце фильтра находится приемная сетка увеличенной площади, на другом — муфта для крепления к ЭЦН. Главный недостаток конструкции в том, что ее невозможно применять для эксплуатационных колонн диаметром менее 168 мм. Кроме того, фильтр-кожух увеличивает общий диаметральный габарит, а значит, возникает проблема с подготовкой скважин, т. е. в данном случае имеют место все известные недостатки, связанные с применением кожухов.

Еще одним видом специальных фильтров является *фильтр-насадка ФНТ* [10], который крепится к компенсатору УЭЦН через пакер-разобщитель ПРС-146 (168). Установка ПРС-146 (168) производится путем долива жидкости в скважину либо закачки с помощью агрегата и затем за счет снижения динамического уровня после запуска УЭЦН. К недостаткам относятся риск повреждения уплотнительных элементов пакера при спуско-подъемных операциях и риск нераспакерования при посадке. Кроме того, существует ограничение по допустимой нагрузке на нижнюю часть погружного двигателя — 500 кг. *Фильтр противопесочный типа ФПБН* [10] присоединяется к нижней части погружного электродвигателя (исполнение ФПБН-85) или к нижней части кожуха электродвигателя (рис. 8) (исполнение ФПБК-85). Фильтр ФПБН-85 включает в себя фильтр-насадку ФНТ, предохранительный клапан и разобщитель, который отсутствует в конструкции фильтра ФПБК-85.

*Скважинный фильтр на проволочной основе типа ФС-73 [10] устанавливается на пакере ниже УЭЦН (рис. 9). К его преимуществам относятся возможность осуществления нескольких спуско-подъемных операций с установкой ЭЦН без подъема фильтра, достаточно высокая пропускная способность (до 400 м<sup>3</sup>/сут) и независимость от габарита УЭЦН. К недостаткам относится увеличение времени на текущий ремонт скважины в связи с дополнительной подготовкой ствола скважины с последующей установкой данной конструкции. Кроме того, существуют риски преждевременной посадки пакера при спуско-подъемных операциях.*

и, напротив, невозможности посадки пакера на нужной глубине, а также риска повреждения пакера, прихвата и аварии при извлечении фильтра, пропуска КВЧ и пропанта при негерметичности пакера, засорения фильтра в результате отсутствия притока. К тому же фильтр ФС-73 спускается только после подтверждения потенциала скважины т. е. не ранее чем при проведении второго рейса (второй спуско-подъемной операции) после ГРП.

Многих из этих перечисленных недостатков лишены фильтры из проволочных проницаемых материалов (ППМ). Примерами фильтров данного типа являются входной фильтр ФВПР, подвесные фильтры ФПР [12], предназначенные для применения в составе насосов УЭЦН с номинальными подачами 5–600 м<sup>3</sup>/сут в целях предотвращения попадания в рабочие органы насосных секций механических примесей (песка, проплакта и пр.).

входной фильтр ФВПР представляет собой входной модуль УЭЦН (рис. 10а) с фильтрующим элементом на основе ПМП со специальной структурой (рис. 10б). Конструкция обеспечивает дренаж отфильтрованных частиц из внешней колыцевой полости фильтра. Модуль спускается в составе погружной установки. Для предотвращения снижения дебита установки вследствие засорения фильтрэлементов на фильтре возможно применение перепускных клапанов или байпасной системы

клапанов или синтетической системы.

К числу преимуществ фильтров из ППМ относятся модульная конструкция (рис. 10в), неограниченная длина (поверхность), щелевой эффект ППМ и способность фильтрующих элементов (рис. 11) к отbrasыванию примесей при низкой скорости фильтрации. Фильтры характеризуются высокой скважностью (большую площадью рабочей поверхности), низким гидравлическим сопротивлением, дренажом механических примесей с поверхности фильтра за счет упругих свойств материала и возможностью регенерации при ремонте благодаря расширению каналов при промывке противотоком.

Фильтры из ППМ могут быть разных конструкций и с различной эффективной площадью фильтрации. Они могут иметь

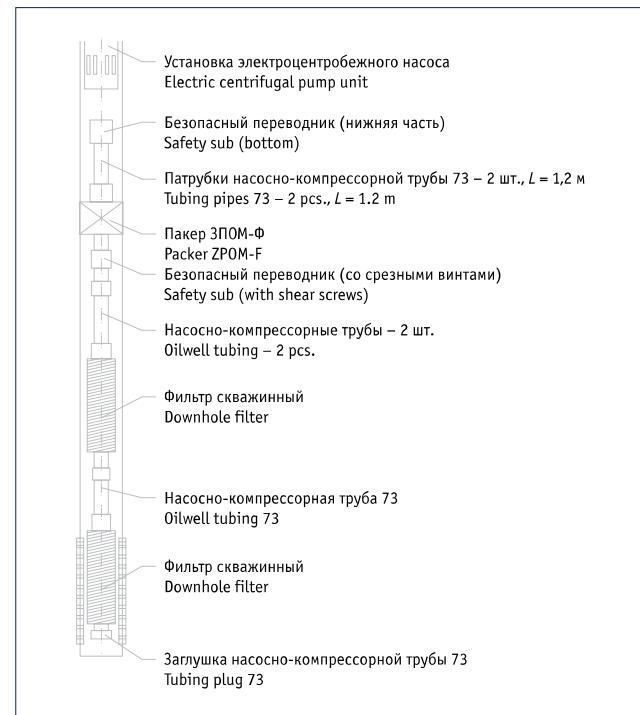


Рис. 9. Скважинный фильтр на проволочной основе типа ФС-73 [10]  
Fig. 9. FS-73 wire-based borehole filter [10]

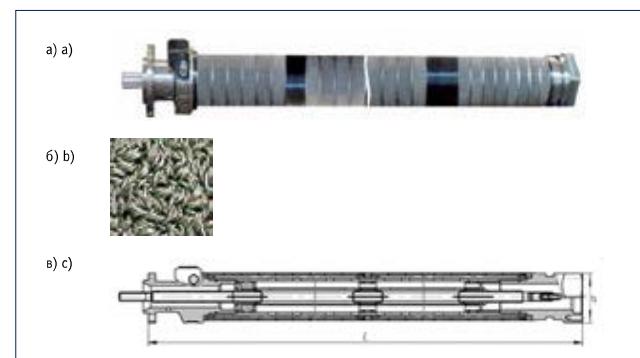


Рис. 10. Фильтр – входной модуль ФВПР:  
 а) общий вид; б) фильтрующая структура проволочно-проницаемых материалов; в) конструкция фильтра [12]  
 Fig. 10. Filter – input module FVPR:  
 a) general view; b) filtering structure of wire-permeable materials; c) design of the filter [12]



Рис. 11. Фильтрующие элементы из проволочно-проницаемых материалов  
Fig. 11. Filter elements made of wire-permeable materials

различную тонкость очистки как по высоте (длине), так и по толщине стенки фильтрующей поверхности.

#### Основные характеристики фильтров из ППМ:

- тонкость очистки – от 5 (для фильтров систем подготовки воды под технологии ППД) до 500 мкм. Стоит отметить, что для фильтров погружных насосов УЭЦН наиболее востребована величина тонкости фильтрации 200 мкм;
- рабочие перепады давления – до 25 МПа;
- рабочее давление – до 200 МПа;
- температура рабочих сред – от –60 до 600 °C.

Возможна многократная регенерация фильтров посредством механической очистки, обратного потока, ультразвука, выжига отложений и др. Фильтры изготавливаются в коррозионно-стойком и не коррозионно-стойком исполнениях и предназначены для фильтрации из пластового флюида механических примесей с заданным размером частиц. Опыт эксплуатации УЭЦН с фильтрэлементами из ППМ показал эффективность фильтров данного типа и подтвердил возможность их применения в осложненных условиях, где наблюдается такое явление, как сероводородное коррозионное растрескивание под напряжением [11].

Разработаны конструкции фильтров – входных модулей с бесперфорированным корпусом, подвесные фильтры с фильтрующей системой из ППМ с возможностью монтажа на кожухе электродвигателя, разобщителе, с креплением к нижней части погружного электродвигателя или термоманометрической системы, а также к пакеру и др.

Для решения достаточно специфических и сложных задач в области фильтрации сред, таких как улучшение регенерации фильтра и увеличение срока его службы, возможно комбинированное послойное исполнение фильтрующей структуры ППМ-УР [11] с добавлением современных технологичных материалов и покрытий. В целях подтверждения свойств фильтрующей структуры ППМ-УР были проведены испытания в РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина [9].

Практика показала, что применение фильтров ФВРП способствует увеличению межремонтного периода УЭЦН, снижению энергозатрат за счет меньшей потребляемой мощности и обеспечивает более высокую степень отфильтровывания частиц загрязнителя (двухслойное фильтрование). К числу недостатков данных фильтров относится засорение механическими примесями и солями, образующими конгломераты с нефтью, вследствие чего способность фильтров из ППМ к регенерации снижается за счет обратного тока жидкости. К числу методов, позволяющих решить эту проблему, относится нанесение гидро- и олеофобных покрытий на основе фтор- и кремнийорганических материалов, которые способны препятствовать адгезии к поверхности фильтрующих структур продукции пласта. Лабораторные исследования показали, что для образцов фильтров с фильтрэлементами, обработанными по технологии нанесения гидро- и олеофобных покрытий на основе фтор- и кремнийорганических материа-

лов (рис. 12), величина краевого угла смачивания составляет не менее 110 °. Изготовление опытной партии изделий и проведение опытно-промышленных испытаний в осложненных условиях позволит подтвердить эффективность данного технологического решения.

#### СООТВЕТСТВИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЯМ ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХ КОМПАНИЙ

Коэффициенты работы фильтрационных систем и сепараторов нефтяными компаниями предъявляются требованиям, удовлетворение которых является обязательным критерием применимости на объектах этих компаний. Например, в ПАО «НК «Роснефть» действуют Единые технические требования, версия 6.0, в которых приведены минимально допустимые значения эффективности работы сепараторов и фильтров при различных условиях эксплуатации (табл. 2).

Для сравнения фильтрационных систем и сепараторов различных конструкций и производителей, установления соответствия эффективности работы минимальным требованиям нефтяных компаний, а также в целях определения рациональной области применения оборудования с учетом влияния различных факторов на кафедре машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина была разработана методика и собран испытательный стенд, прошедшие процедуру добровольной сертификации, в т. ч. в ПАО «НК «Роснефть» и ПАО «ЛУКОЙЛ». Конструкция



Рис. 12. Блок фильтрующий с гидрофобным покрытием, капля окрашенной воды на поверхности проволочно-проницаемых материалов

Fig. 12. Filter unit with hydrophobic coating, a drop of colored water on the surface of wire-permeable materials

Таблица 2. Требования к эффективности работы сепараторов и фильтров согласно Единым техническим требованиям (версия 6.0) ПАО «НК «Роснефть»

Table 2. Requirements for the efficiency of separators and filters in accordance with the Unified Technical Requirements (version 6.0) of Rosneft PJSC

Параметр Parameter	Величина Value				
Номинальный дебит жидкости, указываемый в маркировке десандера, м <sup>3</sup> /сут Nominal liquid flow rate indicated in the desander labeling, m <sup>3</sup> /day	15	35	75	150	250
Значения расходов жидкости при тестировании, м <sup>3</sup> /сут Liquid flow rates during testing, m <sup>3</sup> /day	10, 15, 25	25, 35, 50	50, 75, 100	100, 150, 200	200, 250, 300
Минимально допустимая эффективность сепарации при тестировании на воде, материал – кварцевый песок, 0,1 мм Minimum permissible separation efficiency when tested on water, material – quartz sand, 0,1 mm	75	85	90	95	100
Минимально допустимая эффективность сепарации при тестировании на воде с содержанием свободного газа 25 % Minimum permissible separation efficiency when tested on water with 25 % free gas			Снижение эффективности не более чем на 5 % Decrease in efficiency by no more than 5 %		Не регламентируется Not regulated
Минимально допустимая эффективность сепарации при тестировании на глицериновом растворе с вязкостью 25 мПа·с, материал – проппант 30/60 Minimum permissible separation efficiency when testing on a glycerol solution with a viscosity of 25 mPa s, material – proppant 30/60	15	25	40	90	100
Максимально допустимые потери давления в сепараторе при испытании на воде, МПа Maximum permissible pressure loss in the separator when tested on water, MPa	0,08 при 25 м <sup>3</sup> /сут 0,08 at 25 m <sup>3</sup> /day	0,15 при 50 м <sup>3</sup> /сут 0,15 at 50 m <sup>3</sup> /day	0,25 при 75 м <sup>3</sup> /сут 0,25 at 75 m <sup>3</sup> /day	0,5 при 150 м <sup>3</sup> /сут 0,5 at 150 m <sup>3</sup> /day	1,5 при 250 м <sup>3</sup> /сут 1,5 at 250 m <sup>3</sup> /day

стенда представлена на рис. 13. Стенд позволяет выявить влияние размера механических примесей, подачи и вязкости модельной жидкости, угла наклона исследуемого сепаратора или фильтра на эффективность сепарации.

Для обобщения результатов стеновых испытаний различных конструкций сепараторов и фильтрационных систем и их сравнения ведется и периодически публикуется рейтинговая таблица, по результатам анализа которой формируются рекомендации и области применения различного типа сепарационного оборудования.

#### ВЫВОДЫ

1. Наличие механических примесей в откачиваемом пластовом флюиде является осложняющим фактором, существенно снижающим наработку

до отказа скважинных насосных установок.

2. Наличие механических примесей в воде, используемой для ППД, приводит к кольматации призабойной зоны нагнетательных скважин, существенному росту затрат на поддержание пластового давления, увеличенному расходу химических реагентов и поверхностно-активных веществ, а также к снижению ресурса технологического оборудования.

3. Применение сепараторов механических примесей инерционного типа обеспечивает практически полную защиту скважинных насосных установок от негативного влияния абразивных частиц. Использование инерционных сепараторов механических примесей обеспечивает отделение от потока пластового флюида частиц с размерами более 20 мкм.

4. Применение фильтрэлементов различного типа в нефтяных скважинах позволяет обеспечить высокую тонкость фильтрации, однако сочетание в пластовом флюиде механических примесей и нефти (с парфинами, смолами и асфальтами), а также высокоминерализованной воды создает на поверхности фильтрующих элементов стойкие конгломераты, которые засоряют фильтрационные отверстия и резко снижают проницаемость фильтра. К сожалению, даже обратный ток жидкости не позволяет в этом случае обеспечить регенерацию фильтрэлементов. В перспективе возможно применение технологий обработки поверхности фильтрующих структур гидро- и олеофобными покрытиями на основе фтор- и кремнийорганических материалов, способными препятствовать адгезии к поверхности

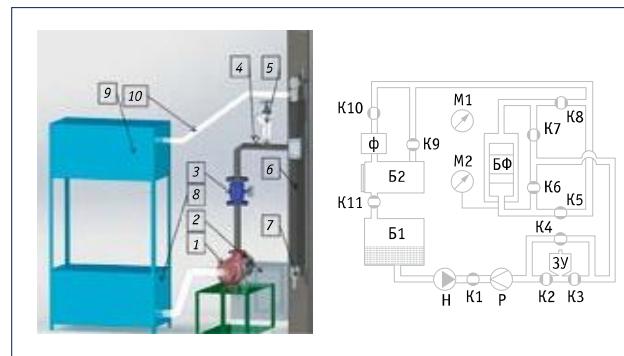


Рис. 13. Стенд для испытаний сепараторов и фильтрационных систем:

а) общий вид; б) схема:  
1 – силовой насос; 2 – станция управления; 3 – расходомер; 4 – манометр; 5 – засыпное устройство; 6 – исследуемый сепаратор; 7 – шламосборник; 8 – емкость для модельной жидкости; 9 – фильтрующий элемент; 10 – выкидная линия

Fig. 13. Stand for testing separators and filtration systems:

а) general view; б) scheme:  
1 – power pump; 2 – control station; 3 – flow meter; 4 – manometer; 5 – filling device; 6 – separator under study; 7 – sludge collector; 8 – capacity for model fluid; 9 – filter element; 10 – discharge line



#### Литература:

- Добыча нефти в России: 1991–2020 [Электронный ресурс]: <http://global-finances.ru/dobyicha-nefti-v-rossii-po-godam/> (дата обращения: 25.10.2020).
- Павлихина А. Экспертный подход к механизированной добыче // Neftgaz.RU. 2019. № 4. С. 92–96.
- Булат А.В. Повышение эффективности работы скважинного насосного оборудования за счет применения сепараторов механических примесей: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2013. 139 с.
- Якимов С.Б., Ивановский В.Н., Деготов А.В. и др. О влиянии фракционного состава абразивных частиц на добываемую жидкость на виды износа деталей электроцентробежных насосов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2017. № 11. С. 32–38.
- Якимов С.Б., Шпорто А.О. О влиянии концентрации абразивных частиц на наработку электроцентробежных насосов с рабочими ступенями из материала нирезист тип 1 на месторождениях ОАО «НК «Роснефть» // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 3. С. 84–99.
- Мельниченко В.Е. Прогнозирование выноса механических примесей из пласта при эксплуатации механизированного фонда скважин // Нефтепромысловое дело. 2017. № 7. С. 38–42.
- Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Булат А.В. Малогабаритные установки подготовки воды для нужд ППД и ППН // Инженерная практика. 2016. № 1–2. С. 90–94.
- ОСТ 39-225-88. Вода для заводнения нефтяных пластов. Требования к качеству [Электронный ресурс]: <https://files.stroyinf.ru/Data1/51/51606/index.htm> (дата обращения: 25.10.2020).
- Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Булат А.В. Опыт разработки и внедрения систем подготовки воды в промысловых условиях // Neftgaz.RU. 2019. № 6. С. 26–29.

сти фильтрующих структур продукции пласта, что повысит эксплуатационную работоспособность скважинных фильтров.

5. Для обеспечения требуемой чистоты воды системы ППД необходимо использовать двухступенчатую систему подготовки, которая должна включать в себя сепаратор механических примесей (первая ступень очистки) и фильтрующий элемент (вторая ступень очистки). Сепаратор обеспечит отбор до 95 % всех механических примесей и значительной части остаточной нефти, оставшиеся механические примеси, в т. ч. мелкие механические частицы с размерами гранул до 2 мкм, будут отбираться фильтр-элементами.

6. Для фильтрэлементов систем подготовки воды для ППД рекомендуется использовать ППМ. Свойства ППМ позволяют создавать для очистки жидкостей и газов от механических примесей эффективные фильтрующие системы, обладающие низким гидравлическим сопротивлением, высокой отфильтровывающей способностью и способностью к многократной эффективной регенерации.

7. Разумная оптимизация конструкций оборудования для защиты от негативного воздействия механических примесей, в котором сочетаются сепараторы и фильтрующие элементы, а также использование специальных материалов с минимальной адгезией к продукции пласта позволит решить проблему повышения ресурса скважинных насосных установок и оборудования для ППД.

- Камалетдинов Р.С., Лазарев А.Б. Обзор существующих методов борьбы с мехпримесями // Инженерная практика. 2010. № 2. С. 6–13.
- Пятов И.С., Воробьева Л.В., Булат А.В. Блоки фильтрующие со структурой ППМ и ППМ-УР. Эффективное, проверенное решение для систем ППД // Бурение и нефть. 2019. № 4. С. 54–57.
- Фильтр и фильтрэлемент: патент RU 2703038 С1, МПК E21B 43/08 / Пятов И.С., Карелина С.А., Ивановский В.Н. и др.; патентообладатель И.С. Пятов; № 2018118841; заявл. 22.05.2018; опубл. 15.10.2019, Бюл. № 29. 12 с.

#### References:

- Oil Production in Russia: 1991–2020. Weblog. Available from: <http://global-finances.ru/dobyicha-nefti-v-rossii-po-godam/> [Accessed 25th October 2020]. (In Russ.)
- Pavlikhina A. Expert Approach to Mechanized Mining, Neftgaz.ru. 2019;(4):92–96. (In Russ.)
- Bulat A.V. Improving the Efficiency of Downhole Pumping Equipment by Using Mechanical Impurity Separators. Thesis for a Candidate Degree in Engineering Sciences. Moscow; 2013. (In Russ.)
- Yakimov S.B., Ivanovsky V.N., Degotsov A.V. et al. On the Influence of the Fraction Composition of Abrasive Particles in Produced Fluid on the Wear Types of the Elements of Electric Centrifugal Pumps. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2017;(11):32–38. (In Russ.)
- Yakimov S.B., Shportko A.O. On the Abrasive Particle Concentration Influence on the Running Hours of Electric Centrifugal Pumps with Operating Stages Made of Ni-Resist. Type 1, at Fields of Rosneft JSC. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2016;(3):84–99. (In Russ.)
- Melnichenko V.E. Prediction of Mechanical Impurities Withdrawal Out of a Formation when Operating an Artificial Fund of Wells. Neftepromyslovoe delo [Oilfield Engineering]. 2017;(7):38–42. (In Russ.)
- Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Bulat A.V. Small-Sized Water Treatment Plants for the Needs of Maintenance of Reservoir Pressure and Oil Preliminary Preparation. Inzheinernaya praktika [Engineering Practice]. 2016;(1–2):90–94. (In Russ.)
- Industry Standard (OST) 39-225-88. Water for Flooding Oil Reservoirs. Quality Requirements. Weblog. Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data1/51/51606/index.htm> [Access date: 25th October 2020]. (In Russ.)
- Ivanovsky V.N., Sabirov A.A., Bulat A.V. Experience in the Development and Implementation of Water Treatment Systems in Field Conditions. Neftgaz.RU. 2019;(6):26–29. (In Russ.)
- Kamaletdinov R.S., Lazarev A.B. Review of Existing Methods of Dealing with Mechanical Impurities. Inzheinernaya praktika [Engineering Practice]. 2010;(2):6–13. (In Russ.)
- Pyatov I.S., Vorob'yeva L.V., Bulat A.V. Filter Units with PPM and PPM-UR Structures. Effective, Proven Solution for Reservoir Pressure Maintenance Systems. Burenie i neft' [Drilling and Oil]. 2019;(4):54–57. (In Russ.)
- Filter and Filtering Element: patent RU 2703038 C1, IPC E21B 43/08. Authors – Pyatov I.S., Karelina S.A., Ivanovskiy V.N. et al. Patent holder – I.S. Pyatov; No. 2018118841, appl. 22.05.2018; publ. 15.10.2019, Bull. No. 29. 12 p. (In Russ.)

