

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОГРУЖНОГО СЕПАРАТОРА ГАЗА И МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА МОДЕЛЬНЫХ СМЕСЯХ

УДК 622.276

В.В. Грачев, ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» (Москва, РФ),

SlavaMGTU@yandex.ru

А.В. Трулев, к.т.н., ГК «Римера» (Москва, РФ), Aleksey.Trulev@rimera.com

Эксплуатация скважин с помощью установок электрических центробежных насосов является одним из основных механизированных видов добычи нефти. В настоящее время эксплуатация нефтяных месторождений осложнена различными геолого-промысловыми и техногенными факторами, вызывающими появление механических примесей и свободного газа на приеме установок электрических центробежных насосов. Одним из методов борьбы с механическими примесями и свободным газом выступает центробежная сепарация.

В статье рассматривается созданный экспериментальный стенд по исследованию характеристик центробежных сепараторов механических примесей и газа с имитатором эксплуатационной колонны. Стенд обеспечивает условия работы сепаратора, сопоставимые с работой в скважине. Также рассмотрен новый центробежный сепаратор, разработанный для одновременной сепарации газа и механических примесей в поле центробежных сил, что должно обеспечить высокие значения градиента давления и, соответственно, коэффициентов сепарации. Проведенные испытания сепаратора на стенде позволили доработать конструкцию стенда и собрать материал для анализа работы сепаратора в скважине. Доработанная конструкция стенда обеспечила стабильные режимы испытаний сепаратора.

По результатам испытаний определена область применения разработанного сепаратора – низкодебитные скважины с газонефтяной смесью, обводненностью свыше 70 %. Обозначены направления дальнейшего улучшения конструкции сепаратора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СЕПАРАТОР ГАЗА И МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ, МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРИМЕСЬ, ЦЕНТРОБЕЖНАЯ СЕПАРАЦИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД, СТЕНД ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СЕПАРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ, ГАЗОЖИДКОСТНАЯ СМЕСЬ, МОДЕЛЬНАЯ СМЕСЬ.

Современные условия эксплуатации нефтяных месторождений осложнены различными геолого-промысловыми и техногенными факторами, приводящими к неэффективной работе механизированных скважин, а в некоторых случаях к преждевременному отказу глубинно-насосного оборудования. Среди механизированных видов добычи нефти эксплуатация скважин установками электрических центробежных насосов (ЭЦН) является одним из основных. При этом метод центробежной сепарации выступает одним из главных при борьбе с вредным влиянием механических примесей на работу электрических центробежных насосов.

На рис. 1 представлено поведение многофазной смеси после ее попадания в поле действия центробежных сил [1–3]. Во время работы ЭЦН многофазная смесь, состоящая из пузырьков газа, воды, нефти и механических примесей, поднимается из забоя скважины на прием погружного центробежного сепаратора, где происходит разделение смеси на фазы, при этом газовая фаза (газ, легкие фракции углеводородов и т. п.) перемещается к оси вращения, а жидкая фаза с твердыми частицами направляется на периферию сепарационной камеры.

Механические примеси могут быть представлены: частицами, выносимыми из пласта в процессе

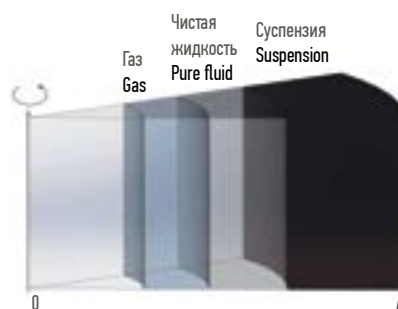


Рис. 1. Разделение фаз в поле центробежных сил
Fig. 1. Separation of phases in the field of centrifugal forces

эксплуатации скважин; продуктами коррозии подземного оборудования; частицами, попавшими в скважину в процессе проведения текущего ремонта скважи-

Grachev V.V., Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)” (Moscow, Russian Federation), slavamgtu@yandex.ru

Trulev A.V., Candidate of Sciences (Engineering), Rimera Group (Moscow, Russian Federation), Aleksey.Trulev@rimera.com

Bench testing of submersible separator of gas and solid particles on the laboratory mixtures

Well operation by electrical submersible pumps is one of the main artificial lifting mechanisms for oil production. At present, the exploitation of oil fields is complicated by various geological and industrial factors and technogenic factors that cause the appearance of solid particles and non-associated gas at the input of electrical submersible pumps. The centrifugal separation is one of the control method of solid particles and non-associated gas.

The article considers the created experimental stand testing the characteristics of the submersible separators of solid particles and the submersible gas separators with the simulator of the casing column. The test stand provides separator working conditions comparable with work in the well. A new centrifugal separator designed for simultaneous separation of non-associated gas and solid particles in the field of centrifugal forces is also considered, that allows to obtain high values of the pressure gradient and, correspondingly, the separation coefficients. The performed tests of the separator on the stand allowed to improve the stand construction and to collect the material for analysis of the separator operation in the well.

The further developed stand construction provided stable test modes of the separator.

Based on the test results, the field of application of the developed separator is identified as low-yield wells with the oil and gas mixture, water cut of more than 70 %. The directions for further improvement of the separator design are defined.

KEYWORDS: SEPARATOR OF SOLID PARTICLES AND GAS, SOLID PARTICLE, CENTRIFUGAL SEPARATION, TEST STAND, TEST STAND OF SOLID PARTICLES CENTRIFUGAL SEPARATION, LIQUID-GAS MIXTURE, LABORATORY MIXTURE.

ны; нерастворимыми твердыми включениями в составе жидкости глушения; обломками проппанта после проведения гидроразрыва пласта; продуктами, образованными взаимодействием химически несовместимых перекачиваемых жидкостей [4].

Механические примеси в каждой конкретной скважине имеют разные значения абразивности, концентрации, плотности, твердости и размеров частиц.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В лаборатории кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина авторами статьи был создан экспериментальный стенд по исследованию характеристик центробежных сепараторов механических примесей (ЦСМ) с имитатором эксплуатационной колонны для погружных центробежных сепараторов.

Испытания ЦСМ на стенде проводили на модельных смесях, которые представлены многофазными потоками с заданными параметрами механических примесей, газа

и жидкости в пределах: расход жидкости от 3 до 200 м³/сут; расход газа от 0 до 400 м³/сут; газосодержание смеси от 0 до 100 %; концентрации взвешенных частиц от 0 до 4 г/л; механические примеси представлены смесью проппанта и кварцевого песка.

Предусмотрена возможность быстрой модификации элементов стенда с учетом требований к исследуемому оборудованию: в обсадной колонне или без нее; количество входов и выходов в сепараторе; наличие в потоке смеси механических примесей, газа и др.

Рассмотрим объект испытаний на стенде – сепаратор газа и механических примесей (рис. 2), использующийся в качестве приемного модуля погружных ЭЦН в пескопроявляющих скважинах с высоким газовым фактором.

В проточной части моноблочного центробежного сепаратора газа и механических примесей пузырьки газа из откачиваемого флюида собираются в глобулы за счет кавернообразующего лопастного колеса. Затем в поле действия центробежных сил происходит разделение потока на фракции. Механические частицы центро-

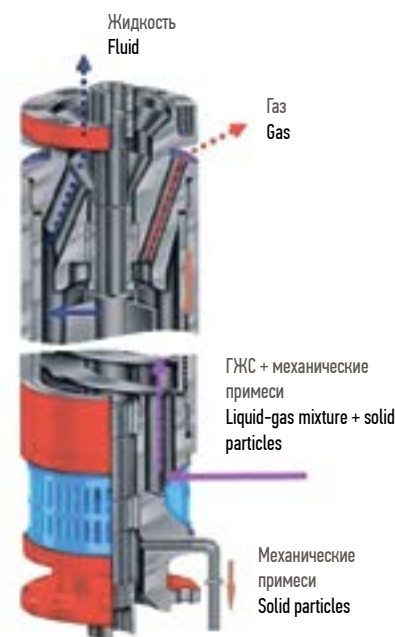


Рис. 2. Сепаратор газа и механических примесей
Fig. 2. Separator of gas and solid particles

бежными барабанами отбрасываются к стенкам гильзы сепаратора, на внутреннем диаметре которой изготовлена проточка с обратной винтовой нарезкой, газ собирается в центральной части сепаратора, очищенная жидкость движется вдоль оси сепаратора в зазоре между потоками газа и

жидкости с механическими примесями.

По обратной винтовой нарезке жидкость с примесями направляется по обводному каналу сепаратора и за счет центробежного колеса, установленного в нижней части сепаратора, увлекается на сброс механических примесей из сепаратора в затрубное пространство. За счет обводной трубки, расположенной на сбросе механических примесей, сброс в затрубное пространство происходит на 20 м ниже, чем расположен прием смеси центробежного сепаратора.

По перекрестным каналам отделенный поток газа устремляется на газовый сброс сепаратора в кольцевое пространство, а поток с жидкостью – на прием ЭЦН.

На стенде ЦСМ при подготовке смеси формируется многофазный поток из жидкости, газа и механических примесей, который подается на прием испытываемому сепаратору с заданными значениями давления и расхода.

Для формирования потока жидкости на стенде был установлен подпорный насосный блок, состоящий из износостойкого насоса с регулируемой подачей жидкости при помощи частотного преобразователя. Замеренный поток газа подается компрессорным реометрическим стендом с диафрагменным расходомером.

Концентрация взвешенных частиц (КВЧ) и их пропорциональное содержание в потоке смеси регулируется на входе ЦСМ путем порционного добавления соответствующих видов механических примесей в модельную смесь. Концентрации и вес используемых мехпримесей регулируются в соответствии с программой испытаний. Пробы КВЧ отбираются на выкидных патрубках при помощи фильтров, отделяющих механические примеси от жидкости с последующей сушкой и взвешиванием мехпримесей.

Различные варианты стенда содержали прозрачные вставки на входе и выходах в испытываемом

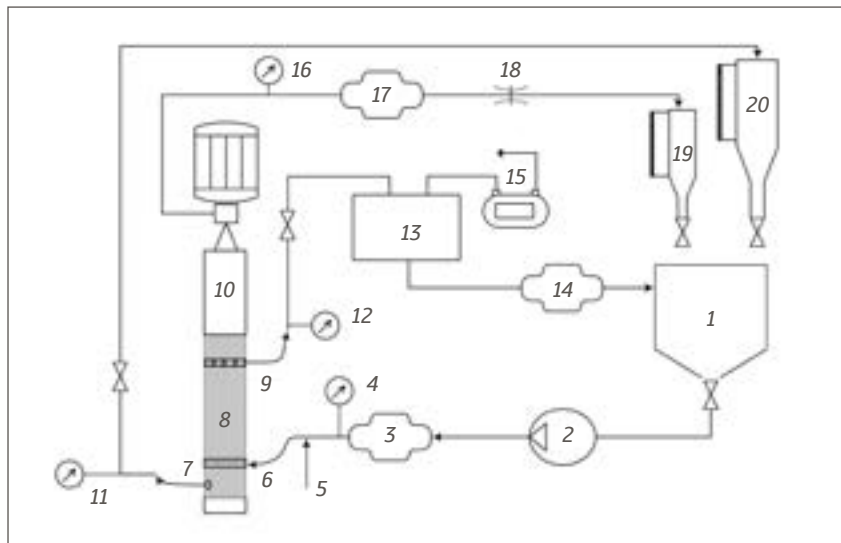


Рис. 3. Испытательный стенд сепаратора газа с механическими примесями: 1 – бак; 2 – подпорный насос; 3 – расходомер; 4 – манометр на входе; 5 – подача газа; 6 – вход сепаратора; 7 – сброс механических примесей сепаратора; 8 – испытываемый сепаратор; 9 – газовый сброс сепаратора; 10 – насос на выходе сепаратора; 11 – манометр на сбросе механических примесей сепаратора; 12 – манометр на газовом сбросе сепаратора; 13 – сепаратор газа; 14 – расходомер жидкости на газовом сбросе сепаратора; 15 – счетчик газа на газовом сбросе сепаратора; 16 – манометр на выходе сборки; 17 – кориолисовый расходомер; 18 – регулирующая струбцина; 19 – мерный бак на выходе сборки «сепаратор – насос»; 20 – мерный бак на сбросе механических примесей сепаратора

Fig. 3. Test bed of separator gas with solid particles: 1 – tank; 2 – booster pump; 3 – flowmeter; 4 – manometer at the input; 5 – gas supply; 6 – separator input; 7 – discharge of solid particles from the separator; 8 – tested separator; 9 – gas discharge of the separator; 10 – pump at the output of the separator; 11 – manometer on the discharge of solid particles from separator; 12 – manometer at the gas discharge of the separator; 13 – gas separator; 14 – liquid flowmeter on the gas discharge of the separator; 15 – gas meter on the gas discharge of the separator; 16 – manometer at the output of the assembly; 17 – Coriolis flowmeter; 18 – regulating clamp; 19 – gauge tank at the output of the separator – pump assembly; 20 – gauge tank at the discharge of solid particles from the separator

оборудовании для съемки потока газожидкостной смеси (ГЖС) с мехпримесями скоростной камерой, а также эксплуатационную колонну с трубопроводами, изгибающимися под прямым углом. В ходе пусконаладочных мероприятий стенд работал нестабильно, значение КВЧ самопроизвольно менялось в процессе испытаний. Выявлено наличие ряда застойных зон на входе в сепаратор и на резких изгибах трубопроводов. Накопление примесей в этих зонах приводило к выбросам механических примесей или, наоборот, к уменьшению КВЧ при изменении работы сепаратора. Механические примеси оседали в застойных зонах при уменьшении скорости потока в трубопроводах или их выносило из застойных зон

при увеличении скорости потока. В застойных зонах наблюдались завихрения потока смеси.

Определенные в результате пусконаладочных работ застойные области стенда были исключены путем изменения конфигурации проточной части трубопроводов, удаления резких поворотов трубопроводов и устранения на стенде ЦСМ возможных ниш для накопления механических примесей.

ИСПЫТАНИЯ СЕПАРАТОРА

Испытание сепаратора газа и механических примесей, имеющего один вход и три выхода, проведено при синхронном замере параметров: одновременно выполнялся замер на всех выходах при выставленном требуемом режиме.

Проведены отдельные испытания с использованием кориолисового расходомера на выходе сепаратора (рис. 3). Поскольку кориолисовый расходомер обеспечивает высокую точность измерения газожидкостного потока, но его эксплуатация запрещена при содержании в потоке механических примесей, в данных испытаниях механические примеси в смесь не добавлялись. В результате получены точные значения коэффициента сепарации газа при различных режимах его работы.

Затем испытания повторялись без участия в схеме стенда кориолисового расходомера, с такими же режимами работы стенда и с механическими примесями в потоке (см. рис. 3). При проведении испытаний без механических примесей фиксировались расходы жидкости и газа на входе и выходах. При испытаниях с механическими примесями повторно создавались те же режимы, расходы жидкости на выходах определялись объемным методом, производился отбор проб смеси с последующим определением КВЧ на выходах сепаратора (см. рис. 3). Совпадение режимов испытаний с механическими примесями и без них проверялось сравнением значений расходов жидкости, замеренных кориолисовым расходомером или объемным способом.

После проведения пусконаладки стенда были проведены стендовые испытания сепаратора газа и механических примесей. Целью испытаний было определение коэффициентов сепарации по газу и механическим примесям в зависимости от входных параметров: газосодержание 0 %; 35 %; 55 %, концентрация взвешенных частиц механических примесей (пропанта и кварцевого песка) 3 г/л.

На стенде ЦСМ производились испытания с модельной грубодисперсной смесью «вода – воздух» (размер глобул газа в потоке до 10 мм), реологические характеристики которой соответствуют

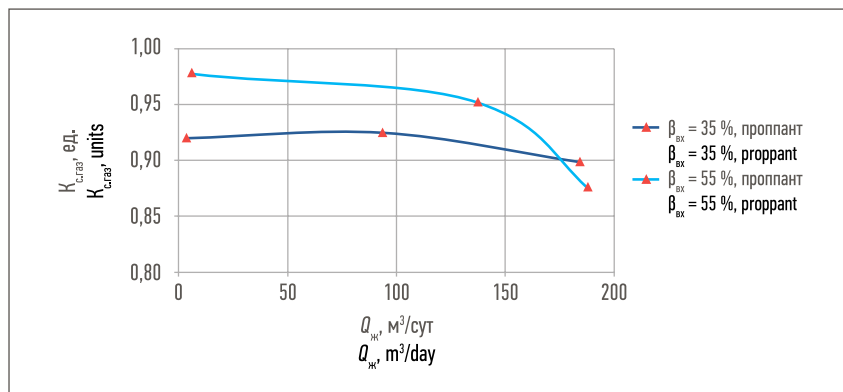


Рис. 4. Зависимость коэффициента сепарации газа $K_{c,газ}$ от расхода жидкости $Q_{ж}$ при входном газосодержании $\beta_{вх} = 35\%$ и 55% на грубодисперсной газожидкостной смеси «вода – воздух – пропанта»

Fig. 4. Dependence of the gas separation coefficient $K_{c,газ}$ on the fluid flow rate $Q_{ж}$ at the input gas content $\beta_{вх} = 35\%$ and 55% on the coarse-dispersed liquid-gas mixture “water – air – proppant”

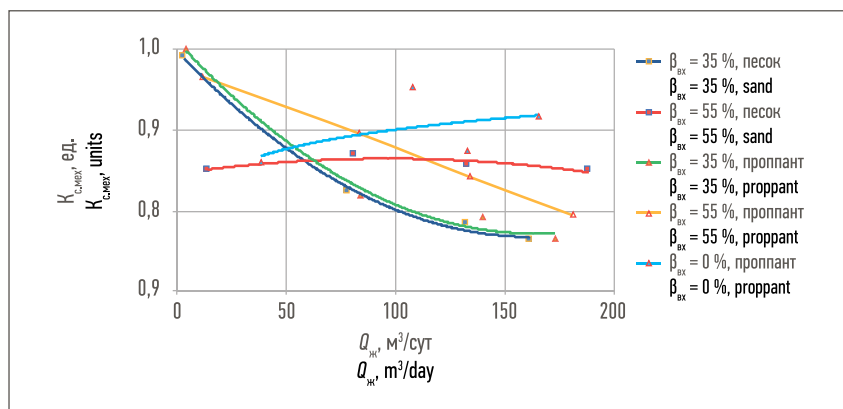


Рис. 5. Зависимость коэффициента сепарации пропанта и кварцевого песка $K_{c,мех}$ от расхода жидкости $Q_{ж}$ при входном газосодержании $\beta_{вх} = 0\%$, 35% и 55% на грубодисперсной газожидкостной смеси «вода – воздух – пропанта» и «вода – воздух – песок»

Fig. 5. Dependence of the separation coefficient of proppant and quartz sand $K_{c,мех}$ from the flow rate $Q_{ж}$ at the input gas content $\beta_{вх} = 0\%$, 35% and 55% on the coarse-dispersed liquid-gas mixture “water – air – proppant” and “water – air – sand”

характеристикам газонефтяной смеси с обводненностью свыше 70 %.

Кроме этого, были проведены испытания сепаратора на стенде с модельной мелкодисперсной смесью «вода – поверхностно активное вещество (ПАВ) – воздух» (ди-солван 4411, концентрация 0,05 %), обладающей реологическими характеристиками, соответствующими характеристикам газонефтяной смеси с обводненностью менее 50 % (в некоторых случаях 60–70 %).

Анализ результатов испытаний позволяет сделать вывод о том, что при увеличении расхода

смеси коэффициент сепарации падает. При увеличении газосодержания на входе коэффициент сепарации повышается (рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выявлена сходимость значений коэффициента сепарации механических примесей для модельных смесей, содержащих песок или пропанта, при входном газосодержании 35 %. При испытании на данных режимах с увеличением расхода жидкости от 10 до 170 м³/сут значение коэффициента сепарации механических примесей $K_{c,мех}$ снижается с 0,99 до 0,76. При газосодержании 55 %

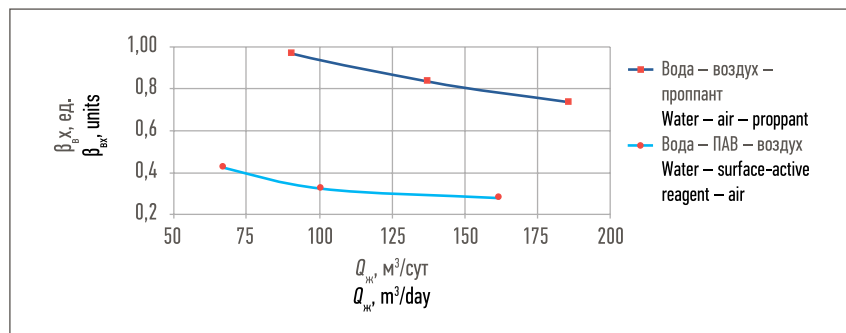


Рис. 6. Зависимость газосодержания на входе $\beta_{вх}$ от расхода жидкости $Q_{ж}$ при газосодержании на выходе $\beta_{вых} = 25\%$ на грубодисперсной газожидкостной смеси «вода – воздух – проппант» и на мелкодисперсной смеси «вода – ПАВ – воздух»
Fig. 6. Dependence of the gas content at the input $\beta_{вх}$ on the liquid flow rate $Q_{ж}$ at the gas content at the output of $\beta_{вых} = 25\%$ on the coarse-dispersed liquid-gas mixture “water – air – proppant” and on the fine-dispersed mixture “water – surface-active reagent – air”

для модельных смесей, содержащих проппант, с аналогичным увеличением расхода жидкости наблюдается уменьшение $K_{с.мех}$ с 0,96 до 0,79. В тех же условиях (при газосодержании 55 %) для модельной смеси, содержащей песок, практически вне зависимости от расхода жидкости на выходе $K_{с.мех}$ остается в пределах 0,85. Аналогично выглядит зависимость модельной смеси с проппантом при отсутствии газа: при увеличении расхода жидкости $K_{с.мех}$ незначительно увеличивается – от 0,86 до 0,91 (рис. 5).

Анализ результатов зависимости газосодержания на входе в сепаратор от расхода жидкости на выходе, при газосодержании на выходе $\beta_{вых} = 25\%$ (рис. 6), выявил ухудшение сепарационной способности по газу с $\beta_{вх} = 97-74\%$ ($Q_{ж} = 91-186 \text{ м}^3/\text{сут}$) до $\beta_{вх} = 42-28\%$ ($Q_{ж} = 67-162 \text{ м}^3/\text{сут}$) при испытаниях на модельной смеси «вода – ПАВ – воздух».

Испытания сепаратора на сепарационную эффективность при различных газосодержаниях на грубодисперсной модельной смеси «вода – газ – проппант» и «вода – газ – песок» показали хороший результат: достигнут высокий коэффициент сепарации как по газу, так и по механическим примесям, низкое остаточное газосодержание на всем диапазоне подач. Такая модель жидкости соответствует обводненной нефти. Испытания на модельной мелкодисперсной смеси «вода – ПАВ – воздух», которая моделирует необводненную нефть, выявили, что данная конструкция работает с приемлемой эффективностью только на малых подачах.

Причиной малой эффективности при работе на модельной смеси «вода – ПАВ – воздух» может быть диспергирование потока газожидкостной смеси винтовой проточкой для отвода механических примесей, в этом случае проявляется взаимное отрицательное

влияние механических примесей и свободного газа, снижающее эффективность их сепарации. Намечены конструктивные решения по устранению этого недостатка.

Разработанный сепаратор может применяться на поздней стадии эксплуатации малодебитных месторождений. Фонд скважин, пригодных для эксплуатации погружных УЭЦН с разработанными газосепараторами-диссепандерами, составляет около 20–30 % от всего фонда скважин в России.

Для повышения эффективности сепарации в конструкции моноблочного центробежного сепаратора газа и механических примесей планируется заменить лопастное радиальное колесо на осевое рабочее колесо и изменить конструкцию гильзы с обратной винтовой нарезкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный испытательный стенд позволяет адекватно имитировать работу сепаратора газа и механических примесей в скважине на приеме установки электрических центробежных насосов.

Определена область применения разработанного сепаратора газа и механических примесей – это малодебитные обводненные скважины, составляющие около 20–30 % от всего фонда скважин в России. Отмечена высокая эффективность центробежной сепарации механических примесей на всем диапазоне подач жидкости и при любом содержании свободного газа. Запланировано дальнейшее улучшение конструкции. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2 т. Т. 1. М.: Химия, 1981. 384 с.
2. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2 т. Т. 2. М.: Химия, 1981. С. 385–812.
3. Михайлов В.Г., Петров П.В. Математическая модель сепарации газа в рабочей камере роторного газосепаратора // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 10. № 1. С. 21–29.
4. Бахтизин Р.Н., Смольников Р.Н. Особенности добычи нефти с высоким содержанием механических примесей // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 5. С. 159–169.

REFERENCES

1. Gelperin N.I. Main Processes and Apparatus of Chemical Technology. In 2 books. Book 1. Moscow, Khimiya, 1981, 384 p. (In Russian)
2. Gelperin N.I. Main Processes and Apparatus of Chemical Technology. In 2 books. Book 2. Moscow, Khimiya, 1981, 385–812 p. (In Russian)
3. Mikhailov V.G., Petrov P.V. Mathematical Model of Gas Separation in the Working Chamber of a Rotary Gas Separator. Vestnik UGATU = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University, Vol. 10, No. 1, P. 21–29. (In Russian)
4. Bakhtizin R.N., Smolnikov R.N. Features of Oil Production with High Content of Solid Particles. Elektronnyy nauchnyy zhurnal “Neftegazovoe delo” = Electronic Scientific Journal “Oil and Gas Business”, 2012, No. 5, P. 159–169. (In Russian)