

На правах рукописи



МУСИНСКИЙ АРТЕМ НИКОЛАЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ
ГАЗОСЕПАРАТОРОВ ДЛЯ ВЫСОКОДЕБИТНЫХ СКВАЖИН**

Специальность: 05.02.13 – Машины агрегаты и процессы
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2021

Работа выполнена на кафедре «Общая физика» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и в Акционерном обществе «Новомет-Пермь».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Пещеренко Сергей Николаевич

Официальные оппоненты: **Ивановский Владимир Николаевич**
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва / кафедра машины и оборудования нефтяной и газовой промышленности / заведующий кафедрой

Волков Максим Григорьевич
кандидат технических наук
ООО «РН-БашНИПИнефть» / заместитель генерального директора по технологическому развитию и инновациям

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Защита диссертации состоится «25» февраля 2022 года в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат диссертации разослан « » 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Латыпов Олег Ренатович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время более 80% нефти в Российской Федерации (РФ) добывается установками электроцентробежных насосов (УЭЦН). А согласно аналитическому центру при Правительстве Российской Федерации объёмы добычи флюида из высокодебитных скважин в России вырастут на 29 % в течение ближайших 5 лет.

Нефть из скважин с дебитом более 100 м³/сут добывается преимущественно с использованием УЭЦН. При этом высокодебитные скважины зачастую осложнены высоким газосодержанием в добываемом флюиде.

Наличие нерастворенного газа в нефти приводит к уменьшению напора насоса, к срыву подачи и простоем оборудования, что ведет к потере объемов добычи. Известно, что эффективным способом удаления газа из добываемой жидкости является применение погружных газосепараторов. При добыче флюида из высокодебитных скважин эффективно отделить жидкость от газа существующими устройствами затруднительно, вследствие малого времени воздействия лопастей газосепаратора на объем скважинной жидкости, что приводит к снижению коэффициента сепарации. Дополнительное осложнение создают механические примеси, которые, концентрируются на периферии проточной области газосепаратора и приводят к гидроабразивному разрушению устройства, что обуславливает разделение УЭЦН на две части, падение нижней части (электродвигателя, гидрозащиты и части газосепаратора) на забой скважины. Для ликвидации последствий таких аварий требуется длительный ремонт скважин.

В связи с вышеуказанным актуальной является задача разработки погружных газосепараторов высокой эффективности и износостойкости при эксплуатации в высокодебитных скважинах.

Степень разработанности темы исследования

Разработкой и исследованием газосепараторов центробежного и вихревого типа занимались: Ш.Р. Агеев, Ф.С. Алханати, Д.В. Вербицкий, Б.Л. Вилсон, М.Г. Волков, А.В. Деньгаев, А.Н. Дроздов, В.Н. Ивановский, Дж.Ф. Ли, П.Д. Ляпков, Д. Лакнер, Р. Маркез, С.Н. Пещеренко, А.В. Трулев. В частности, первый погружной газосепаратор был разработан П. Д. Ляпковым в 1958 году. Исследования П. Д. Ляпкова выявили, что коэффициент сепарации устройства снижается с увеличением подачи и газосодержания в перекачиваемой жидкости. Б.Л. Вилсон и Дж.Ф. Ли разработали первый вихревой газосепаратор в 1998 году для увеличения наработки устройства. А.В. Деньгаев в 2004 году разработал и исследовал газосепаратор 8 габарита на большие подачи, но получить характеристики во всем рабочем диапазоне устройства не удалось.

На данный момент выполнен недостаточный объем исследований влияния геометрии проточных полостей вихревых газосепараторов на износостойкость и сепарационную эффективность устройства.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль): п.1 в части «Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов», и п.3 «Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций».

Цель работы

Повышение эксплуатационной эффективности и износостойкости погружных газосепараторов для высокодебитных скважин на основе совершенствования проточных полостей устройства.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1 Анализ и обобщение теоретических и экспериментальных

исследований эксплуатационной эффективности существующих погружных газосепараторов.

2 Разработка и исследование аналитических моделей сепарации газа в вихревой камере, направленных на определение числа оборотов пузырька газа вокруг оси приводного вала, и гидроабразивного износа деталей газосепараторов.

3 Экспериментальные исследования по определению сепарационных характеристик газосепаратора в зависимости от длины вихревой камеры и от предложенного безразмерного критерия, характеризующего число оборотов пузырька газа вокруг оси приводного вала, а также по определению максимальной величины гидроабразивного износа.

4 Анализ полученных закономерностей изменения эксплуатационных характеристик на основе аналитических и экспериментальных исследований газосепараторов на большие подачи с предложением научно обоснованных технических решений, направленных на повышение эффективности сепарации и гидроабразивной стойкости.

Научная новизна

1 Экспериментально установлен характер изменения зависимости коэффициента сепарации от отношения длины к диаметру вихревой камеры, указывающий на то, что максимум немонотонно изменяющегося графика соответствует отношению длины к диаметру (L/d) в диапазоне 2... 2,5; а минимум в диапазоне 0,5...0,8, что решает задачу выбора длины вихревой камеры в зависимости от габарита устройства.

2 Аналитически установлено и экспериментально подтверждено, что предложенный критерий $X = \frac{LSn}{\beta_{вх}Q_{max}}$, имеет параболическую функцию, которая достигает максимума коэффициента сепарации при значениях $X = 2,3...3,0$ для высокодебитных вихревых газосепараторов, что позволяет решить задачу подбора газосепаратора под известные скважинные условия.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании методологических основ совершенствования конструкций вихревых газосепараторов в 3, 5, 5А, 6 габаритах при максимальной подаче устройства.

Установлена немонотонная зависимость кривой коэффициента сепарации от длины вихревой камеры, связанная с затуханием спирального движения потока.

Практическая значимость

Практическая значимость заключается в разработке и внедрении в серийное производство в АО «Новомет-Пермь» конструкции вихревых газосепараторов, которые имеют коэффициент сепарации более 0,7 в высокодебитных скважинах и характеризуются снижением интенсивности износа защитной гильзы и корпуса устройства за счет применения новой конструкции входной решетки и оптимальной длины вихревой камеры. Проведены приемочные и опытно-промысловые испытания разработанных газосепараторов. На данный момент в эксплуатации находятся 35 установок, оборудованных разработанными автором устройствами, с текущей средней наработкой более 276 суток.

Методология и методы исследования

При выполнении диссертационного исследования применялся комплексный подход, включающий научный анализ, планирование и проведение экспериментальных исследований, обработку экспериментальных данных, измерение, сравнение.

Положения, выносимые на защиту:

1 Экспериментальное подтверждение влияния длины вихревой камеры на немонотонный характер зависимости изменения коэффициента сепарации, при этом максимальное значение коэффициента сепарации обеспечивается при отношении длины вихревой камеры к её диаметру равно $L/d = 2...2,5$ при 2910 об/мин.

2 Результаты аналитических и экспериментальных исследований вихревого газосепаратора для высокодебитных скважин, при которых получены значения предложенного безразмерного критерия $X = \frac{LSn}{\beta_{вх}Q_{max}}$, указывающие на максимум коэффициента сепарации из диапазона значений от 2,3 до 3,0.

3 Научно обоснованные технические решения по определению длины вихревой камеры и применения новой конструкции входной решетки вихревого газосепаратора, позволяющие повысить максимальную подачу газосепаратора в 2 раза с сохранением эффективности сепарации и гидроабразивной стойкости.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты и основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: Всероссийская производственно-техническая конференция: «Эксплуатация осложненного фонда скважин» (Москва, 2019; Сургут, 2018); Международная научно-практическая конференция: «Интегрированное научное сопровождение нефтегазовых активов: опыт, инновации, перспективы» (Пермь, 2019); Всероссийская научно-практическая конференция: «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений и транспорта трудноизвлекаемых запасов углеводородов» (Ухта, 2018); Всероссийская конференция: «Математика и междисциплинарные исследования» (Пермь, 2016, 2017); Международная научно-практическая конференция: «Горная и нефтяная электромеханика: проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования» (Пермь, 2014, 2015, 2017, 2018, 2019).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 22 работы, в том числе 6 из них в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий в соответствии с требованиями ВАК Министерства образования и науки РФ, 6 патентов РФ, 1 статья в рецензируемом журнале из базы данных *Scopus*.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и списка использованной литературы из 127 наименований. Работа содержит 172 страницы машинописного текста, 97 рисунков, 7 таблиц и 3 приложения.

Автор искренне благодарит коллектив инженерно-технического центра АО Новомет-Пермь и к.т.н. Шишлянникова Д. И. за консультации при подготовке диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено общей характеристике работы. Обоснована актуальность темы, сформулирована цель и поставлены задачи работы. Изложены основные научные результаты и защищаемые положения.

Первая глава содержит описание процесса влияния газа на характеристики УЭЦН, методов борьбы с влиянием газа на характеристики насосов, типичных конструкций центробежных и вихревых газосепараторов, причин возникновения их гидроабразивного износа и ухудшения сепарации при увеличении подачи, обосновывается постановка задач исследований.

При концентрации газа на входе в установку до 35-40% применяют следующие методы для снижения негативного влияния газа, такие как заглубление под динамический уровень, использование диспергаторов и насосов конического типа сборки, варьирование частоты вращения установки. При концентрации газа более 40% эффективность перечисленных методов снижается. Применение погружного газосепаратора для сброса газа в затрубное пространство является наиболее эффективным методом при концентрации газа более 40%. Однако, в условиях применения технологий интенсификации нефтедобычи, увеличивается концентрация выносимых механических примесей в добываемой жидкости. Это приводит к гидроабразивному износу защитной гильзы и корпуса газосепараторов, к разрушению установки и «полетам».

Вихревой тип конструкции газосепараторов был предложен для уменьшения гидроабразивного износа. В газосепараторах этого типа сепарация осуществляется в свободном вихре, внутри вихревой камеры.

Ряд авторов указывают, что коэффициент сепарации современных газосепараторов уменьшается при увеличении подачи, и диаметра корпуса. А массовое применение технологий интенсификации нефтедобычи привело как к росту подач, так и габаритов установок электроцентробежного насоса. Возникла необходимость разработки газосепараторов для таких условий.

Показано, что:

1 Центробежные газосепараторы обеспечивают эффективное отделение газа от жидкости на малых и средних подачах по смеси (до 200 м³/сут в 5 габарите). На больших подачах, коэффициент сепарации низкий, это обуславливается большим количеством вихрей, которые в свою очередь, разрушают сепарацию. А низкая гидроабразивная стойкость, связана с накоплением механических примесей в области кавитирующего колеса и шнековой ступени. Эти факторы позволяют предположить о нецелесообразности применения газосепараторов центробежного типа в установках для добычи нефти в высокодебитных скважинах.

2 Недостаточно исследований о влиянии геометрии проточной части на коэффициент сепарации и гидроабразивный износ вихревого газосепаратора.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию процессов сепарации и гидроабразивного износа погружных газосепараторов.

Проанализированы факторы (газосодержание, дисперсность, давление на входе, наличие механических примесей и др.), влияющие на характеристики газосепараторов. Для обнаружения закономерности движения потока в вихревой камере газосепаратора, влияющих на сепарационную эффективность устройства, проведено исследование работы газосепаратора по методике численного моделирования в программном продукте ANSYS по уравнениям Навье-Стокса с моделью турбулентности $k-\epsilon$.

Для несжимаемой жидкости ($\rho = const$) приняты уравнения неразрывности и движения в форме Рейнольдса:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right), \quad (2)$$

где \bar{u} – вектор скорости с компонентами u_x, u_y, u_z ; \bar{p} – вектор давления; μ_{eff} — эффективная вязкость жидкости; ρ – плотность жидкости.

Граничные условия: прилипание жидкости к стенке: $v|_{R1} = 2\pi n R_1$, $v|_R = 0$, где R_1 и R – радиусы соответственно вала (вращающегося) и (неподвижного) корпуса, м; n – частота вращения, об/мин., подача – 175 м³/сут, и атмосферное давление на выходе.

Получено распределение тангенциальной скорости жидкости при перекачке через вихревую камеру газосепаратора (Рисунок 1). Видно, что с увеличением длины вихревой камеры, скорость потока снижается, течение из струйного переходит к хаотичному. Сечение 1 находится на расстоянии 72 мм от завихрителя, 2 – 144 мм, 3 – 216 мм).

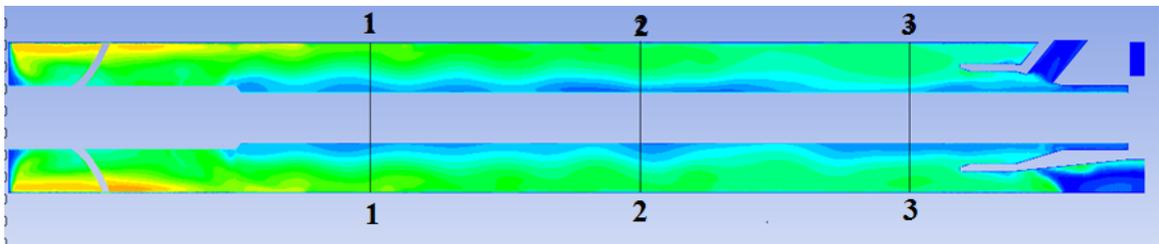


Рисунок 1 – Исоповерхности скоростей жидкости по длине вихревого газосепаратора

В результате получили зависимость тангенциальной скорости от безразмерного радиуса r/R для каждой из плоскостей (Рисунок 2), где r – радиус точки в проточном сечении газосепаратора. Значение 0,3 безразмерного радиуса соответствует области рядом с вращающимся валом, а значение 1 области рядом с гильзой (на периферии). Тангенциальная скорость имеет максимум вблизи стенки гильзы, есть участок, где она увеличивается линейно. Также видно, что максимальное значение тангенциальной скорости снижается с ростом длины вихревой камеры.

Аналитические и численные расчеты позволяют сформулировать гипотезу о том, что в процессе движения потока в вихревой камере происходит сначала воздействие центробежных сил на разделение фаз, а затем затухание спирального движения, которое может привести к снижению коэффициента сепарации.

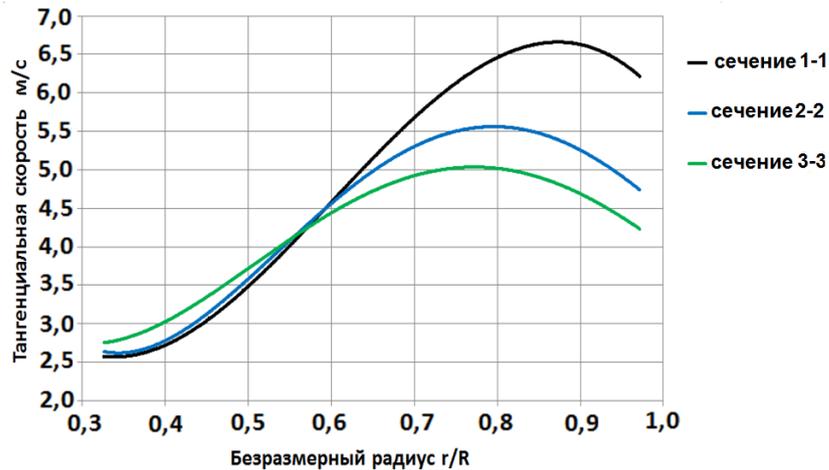


Рисунок 2 – Зависимость тангенциальной скорости от безразмерного радиуса в вихревой камере газосепаратора

Основными причинами отказа погружных газосепараторов, являются разрушение защитной гильзы и разрушение радиальных подшипников. По известным в литературе экспериментальным исследованиям проведено аналитическое описание процесса гидроабразивного износа газосепараторов выявлено, что к ускоренному износу защитной гильзы приводит увеличение скорости вращения вала; большие размеры абразивных частиц; высокая концентрация абразива; высокая твердость частиц абразива. Эти параметры учитывались при компьютерном моделировании гидроабразивного износа.

Для моделирования работы газосепаратора с механическими примесями используются уравнения (1–2) описанные выше. После численного расчета линий тока жидкости проводился расчет движения абразивных частиц. Уравнение для импульса частицы:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = C_x S_p \frac{\omega U_p}{2} + \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 g(\rho_p - \rho_f) + \frac{1}{2} m_f \left(\frac{\partial U_f}{\partial t} - \frac{\partial U_p}{\partial t}\right), \quad (3)$$

где m_p и m_f – масса частицы и жидкости, присоединенной к частице, соответственно; U_f и U_p – скорость жидкости и частицы, соответственно; ρ_p и ρ_f – плотности частицы и жидкости, соответственно; ω – угловая скорость вращения шнека; d – диаметр частицы.

Результаты численного моделирования гидроабразивного износа сравнивали по картине распределения эрозии с износом, полученным в ходе стендовых испытаний в таких же условиях. Максимальный износ в обоих случаях обнаружен на защитной гильзе в месте её стыковки с входной решеткой (Рисунок 3). В месте расположения шнека наблюдаются небольшие возмущения поверхности гильзы, в вихревой камере износа не выявлено.

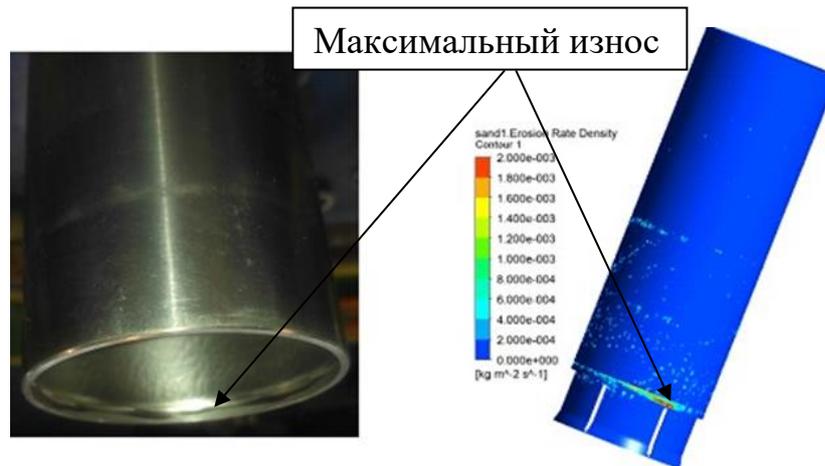


Рисунок 3 – Сравнение результатов экспериментального и численного моделирования мест износа в гильзе газосепаратора

На входной решетке (Рисунок 4) при натурном эксперименте обнаружили, что происходит изнашивание верхних торцов лопаток решетки. При численном моделировании получили максимальные значения износа в тех же местах.

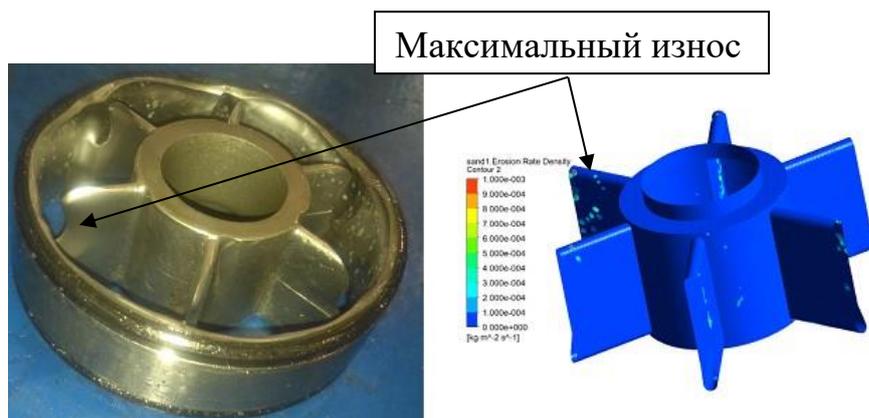
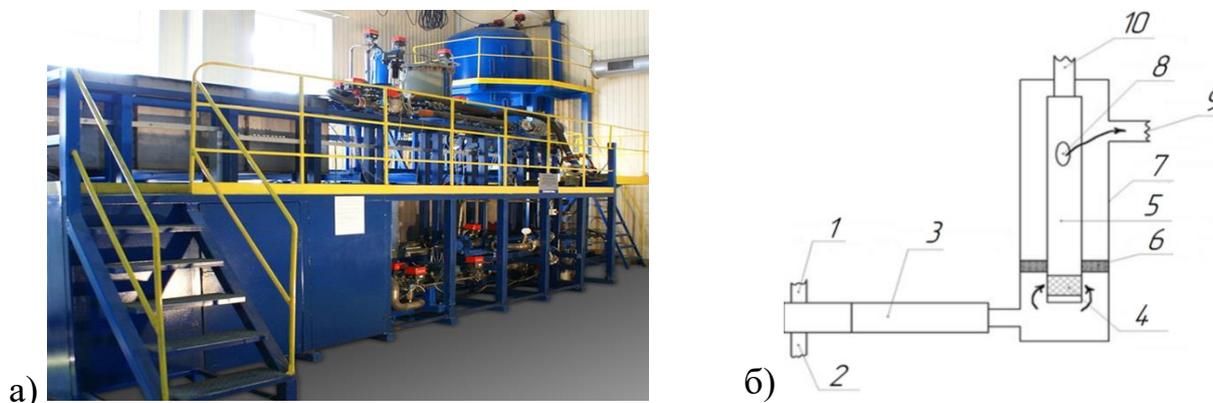


Рисунок 4 – Сравнение мест износа в решетке газосепаратора

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию процесса разделения газа и жидкости в вихревых газосепараторах.

Проведение экспериментальных исследований процесса работы газосепараторов на газожидкостной смеси (ГЖС) осуществлялось с использованием сертифицированного стенда АО «Новомет-Пермь» (Рисунок 5, а), по схеме, указанной на Рисунке 5, б.



1 – узел ввода газа в стенд; 2 – узел ввода жидкости в диспергатор;

3 – диспергатор; 4 – приемная сетка газосепаратора; 5 – исследуемый газосепаратор; 6 – мембрана; 7 – колонна; 8 – выкидные отверстия газосепаратора; 9 – отвод отсепарированного газа; 10 – отвод дегазированной жидкости

Рисунок 5 – Фото (а) и схема (б) стенда для испытаний газосепараторов на ГЖС

При проведении испытаний (Рисунок 5, б) потоки газа и жидкости, направляются в диспергатор 3 через вводы 1 и 2, соответственно. Диспергатор 3

нагнетает ГЖС в колонну 7, внутри которой установлен газосепаратор 5. Вся ГЖС через приемную сетку 4 поступает в газосепаратор 5 так как затрубное пространство перекрыто мембраной 6. В газосепараторе 5 происходит процесс сепарации газа от жидкости. Отсепарированный газ через выкидные отверстия 8 направляется через отвод 9 на замер. Дегазированная жидкость через отвод 10 направляется в насос.

Все величины измеряются непосредственно на стенде при помощи двух газовых расходомеров, электромагнитного расходомера жидкости, датчиков давления, температуры и крутящего момента (Таблица 1).

Таблица 1 – Измеряемые параметры и средства измерения

измеряемый параметр	прибор	диапазон измерения	точность измерения
Расход жидкости	Электромагнитный расходомер Yokogawa AXF	4– 1700 м ³ /сут	± 0,35%
Расход газа	Вихревой расходомер Yokogawa DY	0 – 1728 м ³ /сут	± 1%
Обороты вала газосепаратора	Датчик крутящего момента НВМ	0 – 6000 об/мин	± 0,1%
Момент на валу газосепаратора	Датчик крутящего момента НВМ	0 – 200 Н*м	± 0,1%
Температура воды или газа	Датчик температуры	273 – 373 градусов Кельв.	± 0,25%
Давление	Датчики давления	0 –16 МПа	± 0,15% от max

Для количественной и качественной оценки эксплуатационной эффективности исследуемых конструкций газосепараторов выполнено построение и анализ модели сепарации газа K :

$$K = f(y_1, y_2), \quad (4)$$

где y_1 – длина вихревой камеры, мм; y_2 – частота вращения вала, Гц. Зависимость K от двух переменных y_1 и y_2 выражена через уравнение второго порядка и имеет вид:

$$K = 0,633 + 0,015y_1 + 0,02y_2 - 0,075y_1^2 + 0,003y_1y_2 - 0,045y_2^2. \quad (5)$$

При решении уравнения 5 были получены оптимальные условия (y_1, y_2) коэффициента сепарации K . Подобные условия были найдены при проведении экспериментальных исследований газосепараторов.

Серия экспериментов с варьированием длины вихревой камеры газосепараторов в 5, 5А и 6 габаритах при 2910 об/мин показала, что:

1 Коэффициент сепарации зависит от длины вихревой камеры, эта зависимость немонотонная с двумя экстремумами (Рисунок 6).

2 Оптимальное соотношение длины вихревой камеры к диаметру проточного канала находится в узком диапазоне значений от 2 до 2,5. Значения более 2,5 приводят к снижению коэффициента сепарации. Это связано с затуханием спирального движения газожидкостного потока.

3 Отношение длины вихревой камеры к диаметру проточного канала от 0,5 до 1 является наихудшим с точки зрения коэффициента сепарации для газосепараторов. Это можно объяснить сильной завихрённостью поля скоростей после выхода потока из шнека.

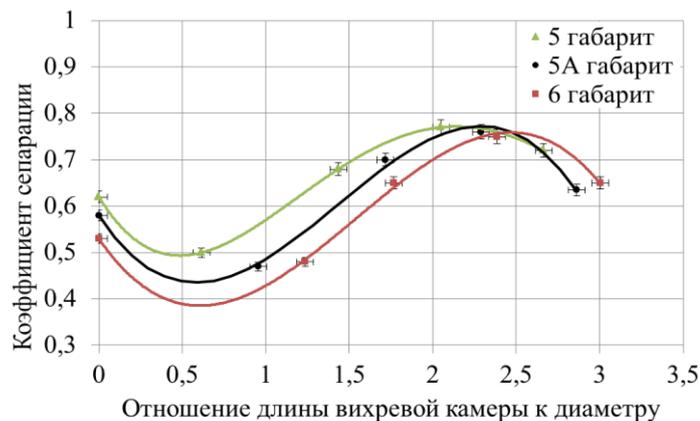


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента сепарации от отношения длины вихревой камеры к диаметру

Предложен безразмерный параметр X , характеризующий число оборотов пузырька газа вокруг оси газосепаратора, определенный следующим образом:

$$X = \frac{LSn}{\beta_{\text{вх}} Q_{\text{max}}}, \quad (6)$$

где L – длина вихревой камеры, м; S – площадь сечения вихревой камеры, м²; n – частота вращения вала, об/мин; Q_{max} – максимальная подача по смеси, м³/сут; $\beta_{\text{вх}}$ – газосодержание на входе в газосепаратор.

Были исследованы три конструкции газосепараторов в 5, 5А и 6 габарите с максимальными подачами 600, 900 и 1200 м³/сут. Дополнительно варьируемые параметры при исследованиях – частота вращения вала (от 1000 до 5000 об/мин) и длина вихревой камеры (от 0 до 250 мм). По полученным данным построили зависимость коэффициента сепарации от безразмерного параметра $K(X)$ для каждого устройства (Рисунок 7), откуда видно, что эта зависимость не монотонная, с максимумом при $X = 2,3...3$. Следовательно, геометрические размеры вихревой камеры газосепаратора для заданных условий эксплуатации ($\beta_{\text{вх}}$, n , Q_{max}) определяются следующей зависимостью:

$$LS = \frac{XQ_{\text{max}}\beta_{\text{вх}}}{n}. \quad (7)$$

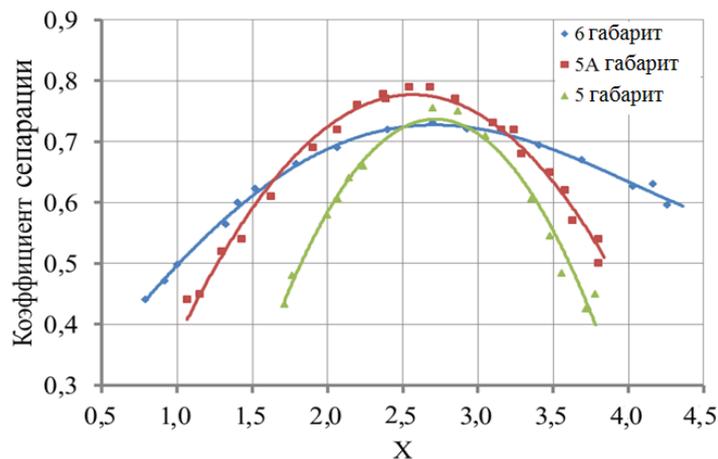
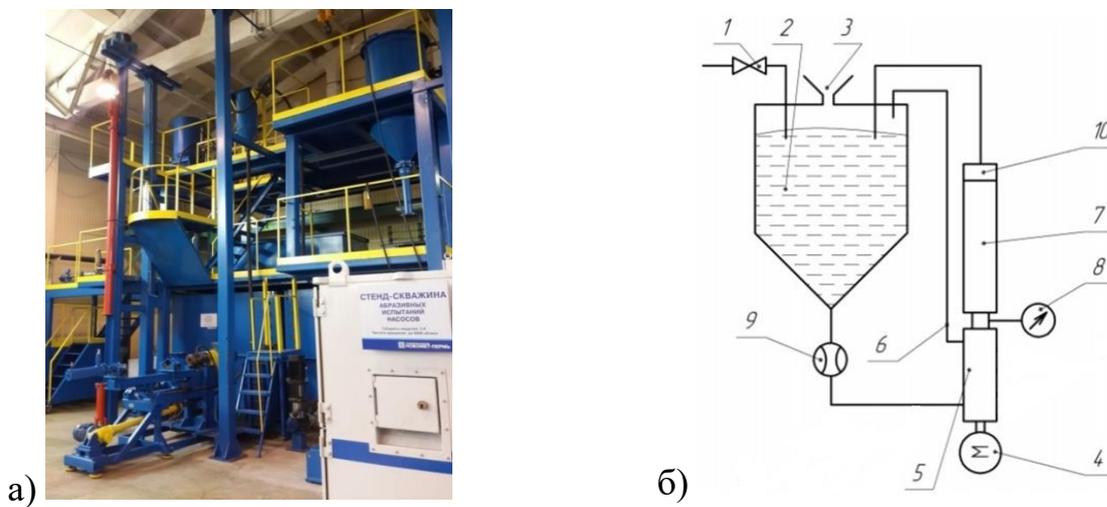


Рисунок 7 – Зависимость $K(X)$ для газосепараторов 5, 5А и 6 габаритов

Таким образом, предложенный критерий позволяет спроектировать газосепаратор (геометрию вихревой камеры) под заданные эксплуатационные

условия, либо рассчитать коэффициент сепарации у существующего устройства и указать допустимый рабочий диапазон.

Четвертая глава посвящена исследованию процесса гидроабразивного износа погружных газосепараторов. Исследования проходили на сертифицированном стенде АО «Новомет-Пермь», на котором проводится большое число испытаний новой и серийной продукции газосепараторов в постоянных условиях (Рисунок 8, а). Экспериментальные исследования проводились на стенде по схеме, указанной на Рисунке 8, б.



1 – подвод жидкости; 2 – бак; 3 – воронка для песка; 4 – приводной двигатель; 5 – газосепаратор; 6 – отвод смеси от выкидных отверстий в бак; 7 – электроцентробежный насос; 8 – датчик давления; 9 – расходомер; 10 – твердосплавный штуцер

Рисунок 8 – Фото (а) и схема (б) стенда для испытаний газосепараторов на гидроабразивной смеси

Основная идея исследований состоит в проведении сравнительных испытаний газосепараторов различных конструкций в одинаковых и контролируемых условиях. Для испытаний применяется гидроабразивная смесь дегазированной воды и кварцевого песка двух фракций: от 500 до 1000 мкм, концентрацией 5 г/л и от 10 до 30 мкм, концентрацией 5 г/л при минимальной подаче жидкости устройства, заданной техническими условиями. Частота вращения вала устройства задается максимальная по техническим условиям на

устройство. Крупная фракция нужна для ускорения износа поверхности проточных каналов, мелкая – проникает в зазоры подшипников и обеспечивает их гидроабразивный износ. Измеряемые параметры и средства измерения с указанием точности замеров представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Измеряемые параметры и средства измерения

измеряемый параметр	прибор	диапазон измерения	точность измерения
Диаметральные размеры деталей	Штангенциркуль ШЦ-I-150-0,05	0 – 150 мм	0,05 мм
Масса деталей	Весы МК-32.2-А21	0 – 32 кг	0,01 кг
Расход жидкости	Электромагнитный расходомер Yokogawa AXF	4– 1700м ³ /сут	± 0,35%
Давление	Датчики давления	0 –1,6 МПа	± 0,15%от max

Критерием отказа является появление сквозных отверстий на защитной гильзе газосепаратора, слом радиального подшипника или потеря массы устройства (детали) более 20% от начальной величины.

Жидкость с песком подаются через задвижку 1 и воронку 3 в бак 2. Из бака 2 смесь проходит через расходомер 9 поступает на вход в газосепаратор 5, работающий от двигателя 4. В газосепараторе 5 происходит гидроабразивное воздействие на детали устройства. Отсепарированная смеси, через выкидные отверстия и трубопровод 6 поступают в бак 2, остальная часть смеси поступает в насосную секцию 7. Твёрдосплавный штуцер 10 определяет объемную подачу системы. По системе трубопроводов смесь сбрасывается обратно в бак 2. Происходит циркуляция смеси по системе. Через час смесь меняется. Датчиком 8 фиксируется давление на выходе газосепаратора.

По результатам исследований на гидроабразивную стойкость погружных газосепараторов выявили следующее:

1 Центробежный тип газосепаратора обладает низкой гидроабразивной стойкостью. Это подтверждается низкими наработками в скважинах, а также результатами экспериментальных исследований. Зоной максимального гидроабразивного износа является кавитирующее колесо и шнековая ступень.

2 Стендовая наработка вихревых газосепараторов более чем в пять раз выше, чем у центробежной. Максимальный износ защитной гильзы наблюдается в месте перехода потока из решетки в шнек (Рисунок 9, а, б). Интенсивному износу подвергаются решетка, защитная гильза и вход шнека.

3 Проведенные эксперименты на разных типах входных решеток показали, что для увеличения гидроабразивной стойкости газосепараторов рациональней применять решетку с конической втулкой и заужением проходного сечения. Решетки с конической втулкой снизили скорость гидроабразивного износа в 3-4 раза по сравнению с базовой конструкцией.

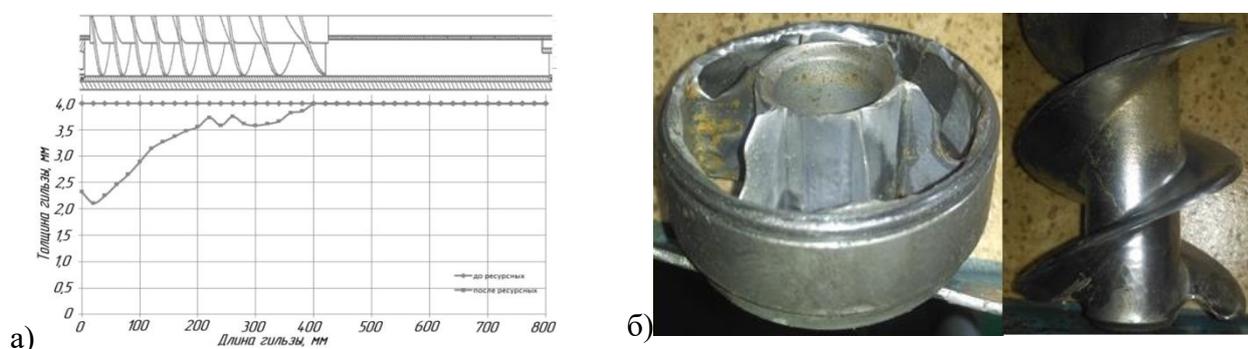
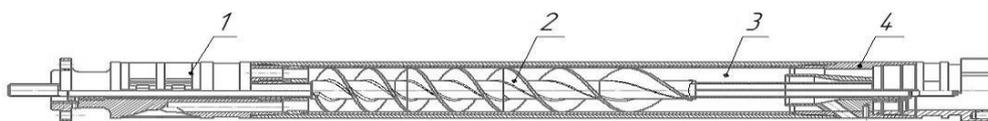


Рисунок 9 – Изменение толщины стенки защитной гильзы по длине после гидроабразивных испытаний вихревого газосепаратора (а), фото, изношенных решетки и шнека (б)

Пятая глава посвящена описанию конструкции и рабочих характеристик разработанных и запатентованных вихревых газосепараторов.

Была разработана конструкция, приведенная на Рисунке 10. На основе данной конструкции были спроектированы газосепараторов в 3, 5, 5А, 6 габаритах для высокодебитных скважин. Вихревой газосепаратор работает следующим образом. Поток газожидкостной смеси через входной модуль 1 поступает в геликоидальный шнек 2, в котором во время движения по спиральной лопасти происходит повышение давления потока газожидкостной смеси и начальное разделение газовой и жидкой фаз в поле центробежных сил.



1 – входной модуль, 2 – геликоидальный шнек, 3 – вихревая камера, 4 – разделитель
Рисунок 10 – Конструкция вихревых газосепараторов для высокодебитных скважин

Затем закрученный поток газожидкостной смеси поступает в вихревую камеру 3, где по инерции продолжает двигаться по спирали с переносом жидкой фазы к периферии и вытеснением газовой фазы к центру. После вихревой камеры 3 с помощью разделителя 4 газ сбрасывается через выкидные отверстия в затрубное пространство, а жидкость подается в насос.

Ниже представлены результаты исследований на сепарацию и абразивную стойкость газосепаратора ГН5-600. Сепарационная характеристика на Рисунке 11 монотонно убывающая, на подаче 100 м³/сут УЭЦН с данным газосепаратором будет работать стабильно с концентрацией газа до 80% и до 55% на максимальных подачах. После гидроабразивных испытаний сепарационная характеристика снизилась до подач 200 м³/сут не значительно.

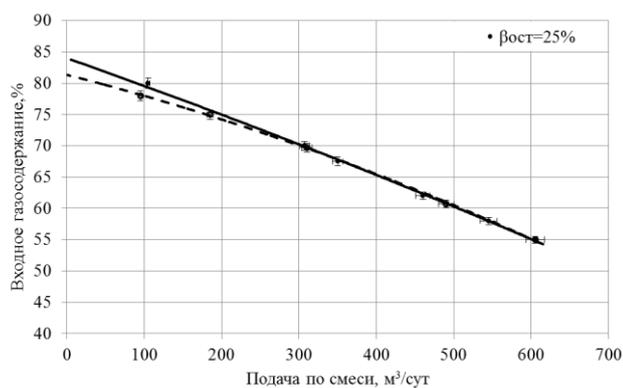


Рисунок 11 – Сепарационная характеристика газосепаратора ГН5-600 сплошная линия – до гидроабразивных испытаний; пунктир – после гидроабразивных испытаний

На Рисунке 12 видно, что входная решетка имеет места изменения формы, но не критичные в рамках стабильной работы устройства.



Рисунок 12 – Внешний вид решетки после гидроабразивных испытаний

После испытаний на гидроабразивную стойкость обнаружено два локальных места повышенного износа по длине защитной гильзы (Рисунок 13). Они обусловлены вихреобразованием на входе потока в шнек, который резко увеличивает радиальную составляющую скорости, и на выходе потока из шнека, из-за обтекания профиля лопасти. Разработанные автором газосепараторы в 3, 5, 5А и 6 габаритах отличаются от известных тем, что длина вихревой камеры определена из соотношения длины к диаметру газосепаратора от 2 до 2,5; решетка, имеет проходное сечение, площадь которого не превышает общую площадь поперечного сечения отверстий.

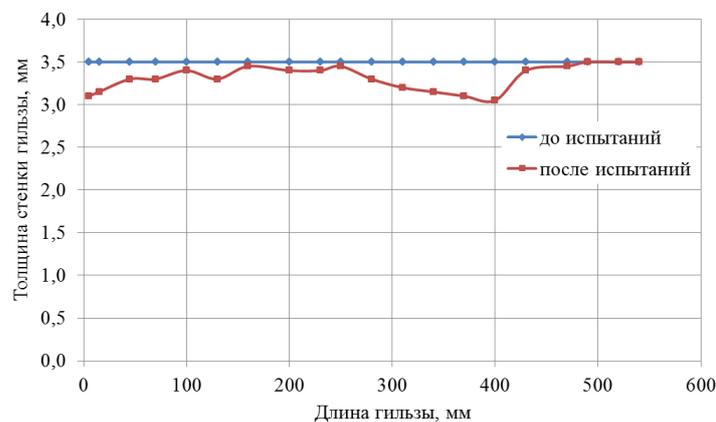


Рисунок 13 – Изменение толщины стенки гильзы после гидроабразивных испытаний

На данный момент в эксплуатации находятся 35 установок, оборудованных разработанными устройствами с текущей средней наработкой более 276 суток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности и разработки газосепараторов вихревого типа для высокодебитных скважин посредством обоснования геометрических параметров устройства. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1 Анализ теоретических и экспериментальных исследований погружных газосепараторов показал, что недостаточно изучен вопрос и отсутствуют аналитические модели процесса сепарации газа в вихревой камере.

2 Разработан и исследован безразмерный критерий X , который определяет число оборотов пузырька газа вокруг оси приводного вала вихревого газосепаратора, выявлено, что коэффициент сепарации имеет максимум при $X = 2,3 \div 3$. Величина $X = (2,3 \div 3)$ безразмерного критерия вихревых газосепараторов позволяет подобрать оптимальные размеры вихревой камеры (L, S) для заданных условий эксплуатации ($\beta_{вх}, n, Q_{max}$). Эта величина может быть использована как индикатор эффективного подбора существующих газосепараторов к скважинным условиям.

3 Экспериментально установлено, что имеется затухание интенсивности вращения потока ГЖС в вихревой камере, которое приводит к немонотонному характеру зависимости изменения коэффициента сепарации от длины вихревой камеры. При этом максимальное значение коэффициента сепарации в вихревой камере обеспечивается при отношении длины вихревой камеры к её диаметру в диапазоне $2 \dots 2,5$ при 2910 об/мин. Экспериментальные исследования гидроабразивного износа показали, что максимальный износ защитной гильзы наблюдается в месте перехода потока от решетки в шнек и объясняется снижением скорости потока в переходной зоне от неподвижной детали к вращающейся, и как следствие происходит накопление механических примесей, а предложенное техническое решение.

4 На основе научно обоснованных технических решений по изменению конструкции входной решетки позволили снизить скорость гидроабразивного износа в переходной зоне в 4 раза за счет локального увеличения скорости потока, что препятствует накоплению механических примесей; и по определению длины вихревой камеры для заданного габарита обеспечивающую высокий коэффициент сепарации при больших подачах газожидкостной смеси разработаны газосепараторы в 3, 5, 5А и 6 габаритах для высокодебитных скважин.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

Статьи из журналов, рекомендованных ВАК РФ:

1. Мусинский, А.Н. Оптимизация конструкции вихревых газосепараторов / А.Н. Мусинский, М.О. Перельман, С.Н. Пещеренко // Нефтегазовое дело. - 2019. - Т. 17, № 4. - С. 100-105.

2. Мусинский, А.Н. Исследование влияния рабочих параметров газосепараторов на эксплуатационные свойства / А.Н. Мусинский, Р.Р. Гизатуллин, В.Г. Островский, С.Н. Пещеренко // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2019. - №5 (113). - С. 20-26.

3. Мусинский, А.Н. Исследование характеристик абразивостойких газосепараторов в промышленных и стендовых условиях / А.Н. Мусинский., М.О. Перельман, С.Н. Пещеренко, А.В. Деньгаев, В.С. Вербицкий // Экспозиция Нефть Газ. – 2017. – № 3 (56). – С.56-59.

4. Мусинский, А.Н. Исследование накопления механических примесей в проточных полостях газосепараторов и их влияние на абразивный износ / А.Н. Мусинский, В.Г. Островский, С.Н. Пещеренко // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 7 (134). – С.23-25.

5. Мусинский А.Н. Перспективы развития вихревых газосепараторов с точки зрения энергоэффективности / А.Н. Мусинский, С.Н. Пещеренко // Территория Нефтегаз. - 2019. - № 9. -С. 38-49

6. Мусинский А.Н. Влияние длины вихревой камеры на напорные и сепарационные характеристики погружных газосепараторов / А.Н. Мусинский, С.Н. Пещеренко // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2015. – № 3 (67). – С.12-15.

Статьи в журналах базы Scopus:

1. Мусинский А.Н. Мультифазный насос для поверхностной перекачки газожидкостной смеси / А.А. Одинцов, А.Н. Мусинский, С.Н. Пещеренко // Нефтяное хозяйство. - 2020. - № 2. - С. 62-64.

Патенты:

1. Пат. № 2696040 С1 Российская Федерация, МПК E21B 43/38. Абразивостойкий роторный газосепаратор: № 2018141445: заявл. 26.11.2018: опубл. 30.07.2019 / М. П. Пещеренко, С. Н. Пещеренко, А. Н. Мусинский, А. А. Одинцов.

2. Пат. № 2660972 С1 Российская Федерация, МПК E21B 43/38. Вихревой газосепаратор: № 2017133195: заявл. 22.09.2017: опубл. 11.07.2018 / М. П. Пещеренко, С. Н. Пещеренко, А. Н. Мусинский.

3. Пат. на полезную модель № 173966 U1 Российская Федерация, МПК E21B 43/38. Вихревой газосепаратор: № 2017120961: заявл. 14.06.2017: опубл. 22.09.2017 / А. Н. Мусинский, М. П. Пещеренко, С. Н. Пещеренко.

4. Пат. на полезную модель № 161892 U1 Российская Федерация, МПК E21B 43/38. Вихревой газосепаратор: № 2015100464/03: заявл. 12.01.2015: опубл. 10.05.2016 / А. Н. Мусинский, М. П. Пещеренко, С. Н. Пещеренко.

5. Пат. на полезную модель № 153249 U1 Российская Федерация, МПК E21B 43/38. Сквaziнный вихревой газосепаратор: № 2014153139/03: заявл. 25.12.2014: опубл. 10.07.2015 / А. Н. Мусинский, М. П. Пещеренко, С. Н. Пещеренко.

6. Пат. № 2547854 C1 Российская Федерация, МПК E21B 43/38. Сквaziнный вихревой газосепаратор (варианты): № 2014114781/03: заявл. 14.04.2014: опубл. 10.04.2015 / М. П. Пещеренко, С. Н. Пещеренко, А. Н. Мусинский.

В других изданиях:

1. Мусинский, А. Н. Влияние длины вихревой камеры на коэффициент сепарации погружного газосепаратора / А. Н. Мусинский, С. Н. Пещеренко // Математическое моделирование в естественных науках. – 2014. – Т. 1. – С. 172-175.

2. Мусинский, А. Н. Вихревой абразивостойкий погружной газосепаратор 7а габарита / А. Н. Мусинский // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2014. – № 1. – С. 491-494.

3. Musinskiy, A. N. Gas separator of 535 series / A. N. Musinskiy, M. P. Peshcherenko // Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности. – 2014. – No 1. – P. 22-25.

4. Мусинский, А. Н. Рабочие характеристики разработанных устройств для борьбы с газом при частоте 5820 об/мин / А. Н. Мусинский, С. Н. Пещеренко // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2015. – Т. 1. – С. 118-124.

5. Мусинский, А. Н. Гидродинамические газосепараторы для высокодебитных скважин / А. Н. Мусинский, С. Н. Пещеренко // Актуальные задачи механики сплошных сред: Тезисы докладов и программа Всероссийской научно-практической конференции, Пермь, 18–19 ноября 2014 года / Ответственный за выпуск В.Г. Козлов. – Пермь: "Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет", 2014. – С. 36.

6. Мусинский, А. Н. Новые абразивостойкие газосепараторы и газостабилизаторы / А. Н. Мусинский, С. Н. Пещеренко // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2016. – Т. 1. – С. 98-102.

7. Мусинский, А. Н. Экспериментальное исследование напорной и сепарационной характеристик погружных вихревых газосепараторов / А. Н. Мусинский, С. Н. Пещеренко // Математика и междисциплинарные исследования - 2016: Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, Пермь, 16–19 мая 2016 года. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2016. – С. 92-96.

8. Мусинский, А. Н. Сепарационная характеристика современных центробежных погружных газосепараторов / А. Н. Мусинский // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2018. – Т. 1. – С. 282-287.

9. Мусинский, А. Н. Критерий энергоэффективности погружных газосепараторов / А. Н. Мусинский // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2019. – Т. 1. – С. 222-228.