

*На правах рукописи*

**Коротков Юрий Григорьевич**



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ПЕСКОПРОЯВЛЯЮЩИХ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН  
УСТАНОВКАМИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ  
НАСОСОВ**

*Специальность 2.8.4. Разработка и эксплуатация  
нефтяных и газовых месторождений*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент

*Шишлянников Дмитрий Игоревич*

**Официальные оппоненты:**

*Гиляев Гани Гайсинович*

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», кафедра нефтегазового дела имени профессора Г. Т. Вартумяна, заведующий кафедрой;

*Макеев Андрей Александрович*

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» (г. Тюмень), проектный офис по сопровождению деятельности совместных предприятий, старший менеджер.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта.

Защита диссертации состоится **2 июля 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.13 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru). Автореферат разослан 30 апреля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



САВЕНОК  
Ольга Вадимовна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

На нефтяных промыслах России и зарубежных стран широкое применение получили установки электроцентробежных насосов (УЭЦН). По данным технической литературы, с использованием данных насосных установок эксплуатируется свыше 65 % скважин и добывается более 80 % нефти. Область применения УЭЦН включает скважины осложненного фонда, эффективная эксплуатация которых определяется временем безотказной работы глубинно-насосного оборудования, что связано с необходимостью предупреждения и преодоления негативных последствий осложняющих факторов.

Одним из факторов, обуславливающим возникновение аварийных отказов УЭЦН, является высокая концентрация частиц механических примесей в добываемой скважинной жидкости. В частности, на нефтяных промыслах Пермского края интенсивное пескопроявление наблюдается при добыче жидкости из терригенных коллекторов. Гидроабразивное изнашивание рабочих ступеней насосов и предвключенных устройств приводит к перерезанию корпусов элементов УЭЦН и, в отдельных случаях, к разрушению и падению частей установок в скважины (полёты на забой), что определяет необходимость выполнения трудоемких и материально затратных ловильных работ при ремонте скважин.

Традиционные способы защиты УЭЦН от гидроабразивного изнашивания предусматривают использование сепараторов механических примесей и фильтров различных конструкций. Однако, эффективность работы сепараторов существенно зависит от скважинных условий, а традиционные конструкции фильтров характеризуются малой грязеёмкостью, ограничивающей время наработки УЭЦН в скважине. Применение электроцентробежных насосов в износостойком исполнении характеризуется высокими затратами на их приобретение.

Таким образом, обоснование технико-технологических решений по увеличению наработки УЭЦН эксплуатируемых в скважинах осложненных пескопроявлением является актуальной научной задачей, решение которой представляет теоретический и практический интерес.

### **Степень разработанности темы исследования**

Вопросам обоснования технологических мероприятий по борьбе с пескопроявлением в нефтедобывающих скважинах посвящены работы Н. А. Аксёновой, И. В. Воробьева, Г. Г. Гилаева, А. В. Деньгаева, А. И. Ермолаева, М. К. Рогачева, Д. С. Тананыхина и других ученых.

Значительный вклад в решение вопросов, связанных с исследованием процесса гидроабразивного изнашивания элементов УЭЦН и обоснованием решений по повышению эффективности эксплуатации пескопроявляющих скважин, внесли Ш. Р. Агеев, В. С. Алексеев, А. А. Богданов, А. В. Булат, В. М. Гаврилко, Н. Е. Гринштейн, Ю. В. Данченко, А. В. Деговцов, Л. С. Животовский, В. Н. Ивановский, В. Я. Карелин, И. А. Кудрявцев, П. Д. Ляпков, Н. А. Лыкова, А. Н. Мусинский, В. Г. Островский, С. Н. Пещеренко, В. М. Попов, А. А. Сабиров, А. М. Рабинович, А. И. Степанов, С. Б. Якимов, K. Pfleiderer, J. F. Gulich и др. Несмотря на значительный объем публикаций в отечественной и зарубежной технической литературе практически не исследован процесс изменения изнашивающих свойств частиц механических примесей при прохождении через рабочие ступени электроцентробежных насосов. Результаты таких исследований позволят обосновать рациональные параметры фильтров для очистки скважинной жидкости от частиц механических примесей при эксплуатации пескопроявляющих нефтяных скважин с использованием УЭЦН.

**Объект исследования** – нефтедобывающая скважина эксплуатируемая с использованием УЭЦН и осложненная пескопроявлением.

**Предмет исследования** – процесс гидроабразивного изнашивания узлов и деталей УЭЦН при эксплуатации пескопроявляющей скважины.

**Идея работы.** Увеличение межремонтного периода скважин осложненных пескопроявлением и предупреждение аварийного разрушения УЭЦН обеспечивается обоснованием рациональных параметров, конструктивных и компоновочных схем устройств очистки скважинной жидкости, а также разработкой способов автоматического срыва подачи УЭЦН при интенсивном развитии гидроабразивного изнашивания.

**Цель работы.** Обоснование технико-технологических решений снижения интенсивности и предотвращения негативных послед-

ствий гидроабразивного изнашивания рабочих органов оборудования УЭЦН при эксплуатации пескопроявляющих нефтяных скважин.

#### **Задачи исследования**

1. Исследование процесса эксплуатации пескопроявляющих нефтяных скважин с использованием УЭЦН.

2. Анализ литературных источников и теоретические исследования процесса гидроабразивного изнашивания рабочих органов оборудования УЭЦН.

3. Экспериментальные исследования процесса гидроабразивного изнашивания рабочих органов оборудования УЭЦН. Оценка изменения абразивности частиц песка при прохождении через рабочие ступени электроцентробежных насосов.

4. Обоснование компоновочных схем, конструкции и параметров устройств очистки скважинной жидкости, функционирующих в составе УЭЦН. Обоснование конструкции и параметров самоочищающихся фильтров УЭЦН для работы в пескопроявляющих нефтяных скважинах.

5. Обоснование способа автоматического срыва подачи УЭЦН при интенсивном развитии гидроабразивного изнашивания и высокой вероятности фрагментарного разрушения узлов насосных установок при эксплуатации пескопроявляющих нефтяных скважин.

#### **Научная новизна**

1. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что при прохождении через рабочие ступени электроцентробежного насоса с потоком перекачиваемой жидкости частицы кварцевого песка измельчаются, при этом величина показателя абразивности частиц увеличивается, что обуславливает повышение интенсивности гидроабразивного изнашивания опорных шайб рабочих ступеней в насосной секции по направлению потока перекачиваемой жидкости.

2. Доказано, что при эксплуатации нефтяных скважин осложненных пескопроявлением увеличение наработки УЭЦН обеспечивается посредством использования каскадных систем очистки скважинной жидкости, а также самоочищающихся фильтров, функционирующих за счет преобразования возвратно-поступательного перемещения компоновки УЭЦН при деформации колонны НКТ в движение устройств восстановления проницаемости фильтроэлементов.

3. Доказано, что предотвращение перерезания корпусов скважинного насосного оборудования с вращающимися роторами, входящего в компоновки УЭЦН и работающего в условиях перекачивания гидроабразивных смесей, обеспечивается на этапе конструирования посредством включения в состав насосного оборудования элементов, реализующих автоматический срыв подачи скважинной жидкости при интенсивном развитии гидроабразивного изнашивания в экспериментально определенных зонах его локального развития.

#### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений по п. 7 «Исследования и обеспечение прочности и надежности промысловых объектов обустройства, нахождения оптимальных и/или рациональных конструктивных решений, включая выбор материалов, силовых схем, размеров и т.п.» и п. 8 «Разработки и усовершенствование методов эксплуатации и технической диагностики оборудования, размещенного на объектах промыслового обустройства месторождений и методов защиты их от коррозии и негативных природных факторов».

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в установлении зависимостей изменения показателей абразивности, формы и геометрических параметров частиц кварцевого песка при прохождении с потоком перекачиваемой жидкости через рабочие ступени электроцентробежных насосов.

Практическая значимость работы заключается в обосновании технических решений по повышению межремонтного периода скважин осложненных пескопроявлением и эксплуатирующихся с использованием УЭЦН. Предложенные технические решения использованы сотрудниками ООО «НСХ «АЗИЯ ДРИЛЛИНГ» при разработке методики обоснования рациональных параметров и конструкций скважинных фильтров, что подтверждается актом внедрения от 17.11.2025.

Результаты работы применяются ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» при обучении студентов по направлению подготовки 21.05.06 «Нефтегазовая техника и технология» по специальности «Разработка

и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», что подтверждается актом внедрения от 11.11.2025.

#### **Методология и методы исследований**

Методология исследований заключалась в анализе и обобщении результатов ранее опубликованных исследований по повышению эффективности эксплуатации пескопроявляющих нефтяных скважин с использованием УЭЦН, выполнении расчетов, проведении экспериментальных исследований по оценке изменения абразивности частиц песка при прохождении через рабочие ступени электроцентробежных насосов с потоком перекачиваемой жидкости.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Частицы кварцевого песка со средним диаметром 0,26 мм и 0,58 мм при прохождении с потоком перекачиваемой жидкости через 80 рабочих ступеней ЭЦН7А-150 электроцентробежного насоса измельчаются до среднего диаметра 0,2 мм и 0,25 мм соответственно, при этом величина показателя абразивности частиц увеличивается на 22,9 % и 37,0 % соответственно, что обуславливает увеличение интенсивности гидроабразивного изнашивания опорных шайб рабочих ступеней в испытываемой насосной секции по направлению потока перекачиваемой жидкости.

2. Увеличение наработки УЭЦН при эксплуатации нефтяных скважин с высоким содержанием абразивных частиц песка в перекачиваемой жидкости обеспечивается посредством использования каскадных систем очистки, а также самочищающихся фильтров, функционирующих за счет преобразования возвратно-поступательного перемещения компоновки УЭЦН при деформации колонны НКТ в движение устройств восстановления проницаемости фильтроэлементов.

3. Предотвращение перерезания корпусов скважинного насосного оборудования с вращающимися роторами, входящего в компоновки УЭЦН и работающего в условиях перекачивания жидкости с высоким содержанием абразивных частиц песка, обеспечивается на этапе конструирования посредством включения в состав насосного оборудования элементов, реализующих срыв подачи скважинной жидкости при интенсивном развитии гидроабразивного изнашивания в экспериментально определенных зонах его локального развития.

### **Степень достоверности результатов**

Достоверность результатов работы обеспечивалась применением широко апробированных, а также оригинальных методик экспериментальных исследований, осуществленных с использованием оборудования, прошедшего государственную поверку. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса гидроабразивного изнашивания оборудования УЭЦН и оценки изменения абразивности частиц механических примесей, проходящих через ступени насоса с потоком перекачиваемой жидкости, согласуются с известными результатами, ранее опубликованными в работах по вопросам конструирования и эксплуатации насосного оборудования. Относительная погрешность экспериментальных данных не превышает 5 %.

### **Апробация результатов**

Основные положения работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на конференциях: всероссийская конференция «Проблемы разработки углеводородных и рудных полезных ископаемых» (г. Пермь, 2023, 2024, 2025 гг.), международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика» (г. Пермь, 2023, 2024 г.), международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В. Р. Кубачека» (г. Екатеринбург, 2022, 2023, 2024 гг.), онлайн-форум ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «Инновации для повышения эффективности сопровождения нефтегазовых активов» (г. Москва, 2024).

**Личный вклад автора** заключается в анализе научной литературы по теме исследования; постановке цели и задач диссертационного исследования; получении исходных данных, разработки методики и выполнении экспериментальных исследований. Варианты конструктивного исполнения самоочищающихся фильтров УЭЦН разработаны при непосредственном участии автора. Организация внедрения результатов диссертационной работы осуществлена в равной степени с соавторами.

### **Публикации**

Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 3 статьях в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени док-

тора наук по специальности 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений; 1 статье в издании, индексируемом в международной наукометрической базе данных *Scopus*. Получен 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, двух приложений, общим объемом 160 страниц печатного текста, содержит 13 таблиц и 58 рисунков, список литературы из 117 наименований.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

**В первой главе** обобщены сведения о конструкции и области применения установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) для скважинной добычи нефти. Установлено, что добыча жидкости с высоким содержанием механических примесей обуславливает возникновение гидроабразивного изнашивания и отказ элементов УЭЦН. На примере Софьинского месторождения ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь» выполнен анализ эффективности технико-технологических решений для защиты элементов УЭЦН, функционирующих в скважинах, осложненных пескопроявлением.

**Во второй главе** выполнен анализ теоретических и экспериментальных исследований процесса гидроабразивного изнашивания рабочих ступеней электроцентробежных насосов (ЭЦН) и предвключенных устройств УЭЦН. Показано, что изнашивание элементов УЭЦН носит локальный характер и неравномерно по длине насосной секции, что обусловлено изменением показателя абразивности частиц при прохождении через рабочие ступени насоса. Приведены методические основы выбора фильтров УЭЦН. Отмечено, что в типовых методиках выбора фильтров по величине концентрации взвешенных частиц и их гранулометрическому составу не учитывается изменение физико-механических свойств частиц примесей при прохождении через рабочие органы элементов УЭЦН.

**В третьей главе** приведена методика, описан порядок проведения и выполнен анализ результатов экспериментальных исследо-

ваний по оценке изменения среднего диаметра, формы и абразивности частиц механических примесей при перекачке модельной гидроабразивной смеси через рабочие ступени насосной секции. Экспериментально доказано, что при прохождении с потоком перекачиваемой жидкости через рабочие ступени ЭЦН частицы механических примесей измельчаются, при этом величина показателя абразивности частиц увеличивается. Изменение указанных параметров и показателей оценено количественно. Доказано, что реализация описываемых процессов обуславливает неравномерное изнашивание опорных шайб рабочих ступеней в насосной секции по направлению потока перекачиваемой жидкости.

**В четвертой главе** на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований обоснованы способы увеличения наработки УЭЦН при эксплуатации скважин осложненных пескопроявлением. Выполнен расчет экономической эффективности использования самоочищающихся фильтров УЭЦН.

**В заключении** обобщены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях.

**1. Частицы кварцевого песка со средним диаметром 0,26 мм и 0,58 мм при прохождении с потоком перекачиваемой жидкости через 80 рабочих ступеней ЭЦН7А-150 электроцентробежного насоса измельчаются до среднего диаметра 0,2 мм и 0,25 мм соответственно, при этом величина показателя абразивности частиц увеличивается на 22,9 % и 37,0 % соответственно, что обуславливает увеличение интенсивности гидроабразивного изнашивания опорных шайб рабочих ступеней в испытываемой насосной секции по направлению потока перекачиваемой жидкости.**

На нефтяных промыслах России и зарубежных стран эксплуатация УЭЦН зачастую осуществляется в осложненных условиях, что обуславливает высокие риски преждевременного выхода установок из строя. Свыше 30 % аварийных отказов УЭЦН вызваны гидроабразивным изнашиванием, при этом в наиболее тяжелых ситуациях воздействие абразивных частиц, содержащихся в перекачиваемой жидкости, сопровождается перерезанием направляющих аппаратов и корпусов насосов (рисунок 1) с последующим падением частей УЭЦН в скважины.

Изнашивание узлов УЭЦН является многофакторным процессом, интенсивность которого определяется выражением (1)

$$dM_i / dt = f(R, F, \rho, H_c, c, K, H_d, F_d, \omega), \quad (1)$$

где  $M_i$  – относительное изменение массы изнашиваемой детали;  $t$  – время воздействия абразивных частиц на изнашиваемую деталь;  $dM_i/dt$  – скорость гидроабразивного изнашивания;  $R, F, \rho, H_c, c$  – размер, форма, плотность, твердость и концентрация частиц механических примесей соответственно;  $K$  – коррозионная активность среды;  $H_d$  – твердость поверхности изнашиваемой детали;  $F_d$  – форма поверхности изнашиваемой детали;  $\omega$  – частота вращения приводного вала УЭЦН.

Влияние физико-механических свойств частиц примесей на интенсивность изнашивания межступенчатых уплотнений ЭЦН учитывается в методике Американского института нефти (API) и оценивается величиной комплексного показателя абразивности, который рассчитывается по формуле (2)

$$AI = 0,3M_{-0,25\%} + 10(2 - K_o - K_s) + 0,25(M_{н.о\%} + M_{кв\%}), \quad (2)$$

где  $AI$  – показатель абразивности механических примесей, %;  $M_{-0,25\%}$  – массовая доля абразивных частиц механических примесей размером менее 0,25 мм, %;  $K_o$  и  $K_s$  – коэффициенты формы и сферичности частиц механических примесей;  $M_{н.о\%}$  – массовая доля нерастворимого остатка (частиц, не растворимых в кислоте), %;  $M_{кв\%}$  – доля частиц кварца в общей массе механических примесей, %.

Анализ формулы (2) показывает, что наибольшее влияние на величину  $AI$  оказывает размер и форма твердых частиц: их округлость и сферичность. Определение величин коэффициентов округлости  $K_o$  и сферичности  $K_s$  частиц механических примесей осуществляется в соответствии с диаграммой Крумбьена-Шлосса (рисунки 2). Практическое использование формулы (2) ограничено не полными данными по физико-механическим свойствам и гранулометрическому составу примесей, выносимых в скважины. Известно, что при прохождении через ступени центробежных насосов абразивность частиц песка изменяется: частицы измельчаются, изменяется их форма, а следовательно и величины коэффициентов округлости  $K_o$  и сферичности  $K_s$ .

Автором выполнены экспериментальные исследования с целью определения зависимостей изменения крупности, формы и абразивности частиц песка, которые содержатся перекачиваемой жидкости, и количеством рабочих ступеней насоса, через которые перекачивается гидроабразивная смесь. Для проведения испытаний использовался стенд, на котором была собрана насосная секция, состоящая из 20 рабочих ступеней ЭЦН7А-150. Стенд (рисунок 3) смонтирован на раме 1, включает в себя приводной двигатель 2, узел ввода жидкости 3, насосную секцию 4, узел отвода жидкости 5, задвижки 6 и 10, нагнетательный трубопровод 7. Комплект измерительного оборудования включает манометр 8 и расходомер 9. Частота вращения вала приводного двигателя составляет 2910 об/мин.

Гидравлическая схема лабораторного стенда приведена на рисунке 4. Из трубопровода 1 через задвижку 2 подводится жидкость к гидравлическому баку 4, который заполняется водой, при этом в отверстие 3 засыпаются механические примеси. Жидкость с частицами примесей из бака 4 подается в трубопровод 5 и через открытую задвижку 6 поступает в ступени испытываемой насосной секции 7, откуда по трубопроводу 11 через задвижку 9 поступает обратно в бак 4. Посредством манометра 8 и расходомера 10 осуществляется контроль давления и расхода перекачиваемой жидкости. Из пробоотборника 12 отбирались пробы жидкости с частицами примесей.

В ходе проведения экспериментальных исследований в качестве гидроабразивной смеси была использована вода с концентрацией механических примесей  $c = 3$  г/л. Исследовалось изменение показателя абразивности  $AI$  частиц следующих материалов:

– кварцевого песка искусственного происхождения, полученного при размоле габаритных кусков кварца в дробилках, средний диаметр частиц  $D_{с.н} = 1,1$  мм (рисунок 5, а);

– песка естественного происхождения двух фракций, средний диаметр частиц  $D_{с.н} = 0,26$  мм и  $D_{с.н} = 0,58$  мм (рисунок 5, б);

– пропшанта со средним диаметром  $D_{с.н} = 0,88$  мм (рисунок 5, в).

Гранулометрический состав модельных примесей для гидроабразивной смеси задавался посредством проведения отсева на фракции исходных материалов на лабораторных ситах. Использование микроскопа с цифровой камерой и специальным программным обеспечением позволило контролировать форму и крупность частиц. Пробы механических примесей отбирались после многократного

прохождения гидроабразивной смеси через ступени насосной секции. Расчет времени отбора проб осуществлялся по формуле (3)

$$T = 3,6NV_6 / Qz, \quad (3)$$

где  $T$  – время отбора проб, с;  $N$  – число рабочих ступеней, через которые пройдет абразивная частица, шт.;  $Q$  – подача испытываемой насосной секции,  $Q = 6,25$  м<sup>3</sup>/час;  $z$  – число рабочих ступеней в насосной секции,  $z = 20$  шт;  $V_6$  – объём бака стенда,  $V_6 = 200$  л.

Пробы жидкости с примесями отбирались после прохождения абразивных частиц через 20, 40, 60 и 80 рабочих ступеней. Результаты исследований представлены на рисунке 6.

Исходя из анализа полученных графиков следует, что крупная фракция частиц песка подверглась интенсивному измельчению, после прохождения 80 рабочих ступеней ЭЦН 7А-150:

– средний диаметр частиц кварцевого песка искусственного происхождения составил  $D_{с.к} = 0,24$  мм (см. рисунок 6, а, поз. 1);

– песок естественного происхождения с частицами  $D_{с.н} = 0,58$  мм измельчился до фракции  $D_{с.к} = 0,25$  мм (см. рисунок 6, а, поз. 2).

Песок естественного происхождения с частицами  $D_{с.н} = 0,26$  мм практически не измельчился –  $D_{с.к} = 0,25$  мм (см. рисунок 6, а, поз. 3).

Частицы измельчённого песка искусственного и естественного происхождения имеют вытянутую пластинчатую форму (см. рисунок 5, з, д), что определяет уменьшение значений коэффициентов округлости и сферичности измельченных частиц по сравнению с частицами исходных модельных абразивных примесей (см. рисунок 6, в, з), обуславливает увеличение показателя абразивности (см. рисунок 6, б) по мере прохождения через рабочие ступени испытываемой секции ЭЦН. Показатель абразивности  $AI$  и, соответственно, изнашивающая способность измельченных частиц после прохождения через 80 ступеней секции ЭЦН увеличился следующим образом:

– для песка естественного происхождения с начальным средним диаметром частиц  $D_{с.н} = 0,58$  мм от  $AI_n = 54,0$  % до  $AI_k = 91,0$  % (показатель абразивности увеличился на 37,0 %);

– для песка естественного происхождения с начальным средним диаметром частиц  $D_{с.н} = 0,26$  мм от  $AI_n = 69,1$  % до  $AI_k = 92,0$  % (показатель абразивности увеличился на 22,9 %);

– для песка искусственного происхождения с начальным средним диаметром частиц  $D_{с.н} = 1,1$  мм от  $AI_n = 60,0$  % до  $AI_k = 70,9$  %.

Полученные выводы подтверждаются результатом ресурсных испытаний аналогичной насосной секции, собранной из 20 рабочих ступеней ЭЦН7А-150. При циркуляции гидроабразивной смеси, где в качестве механических примесей использовался кварцевый песок естественного происхождения, имеющий средний диаметр частиц  $D_{с.н} = 0,58$  мм и концентрацию  $c = 3$  г/л, через испытываемую насосную секцию в течение 4 часов наблюдалось интенсивное изнашивание опорных шайб рабочих колес ступеней по ходу потока от входа к выходу из насосной секции. В результате этого, опорные шайбы, расположенные ближе к входу потока в насосную секцию, имеют меньший износ механическими примесями по сравнению с опорными шайбами, находящимися у дальних по ходу потока рабочих ступеней, т.е. установленных ближе к нагнетательному трубопроводу стенда (рисунок 7).

Результаты экспериментальных исследований показывают, что при работе УЭЦН рациональным является использование фильтров с тонкостью очистки 0,2 мм (200 мкм), так как частицы размером менее 0,2 мм, проходящие через фильтр в насос с потоком жидкости, практически не подвергаются измельчению в ступенях ЭЦН.

Результаты экспериментов, где в качестве гидроабразивной смеси использовалась вода с проппантом, показали, что проппант, проходя с потоком жидкости через рабочие ступени насосной секции, практически не измельчается (см. рисунок 5, в, е). При увеличении концентрации проппанта в модельной смеси до  $C = 3$  г/л происходит практически мгновенное заклинивание ротора насосной секции.

**2. Увеличение наработки УЭЦН при эксплуатации нефтяных скважин с высоким содержанием абразивных частиц песка в перекачиваемой жидкости обеспечивается посредством использования каскадных систем очистки, а также самочищающихся фильтров, функционирующих за счет преобразования возвратно-поступательного перемещения компоновки УЭЦН при деформации колонны НКТ в движение устройств восстановления проницаемости фильтроэлементов.**

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показал, наиболее рентабельным способом защиты элементов УЭЦН от гидроабразивного изнашивания является использование фильтров и сепараторов механических примесей различных конструкций. В то же время, из практики нефтедобычи из-

вестны и основные недостатки данных устройств: малая грязеемкость фильтров и существенная зависимость эффективности работы сепараторов механических примесей от скважинных условий.

Устранение указанных недостатков возможно посредством использования каскадной системы очистки жидкости (рисунок 8). Предлагается монтировать под компоновку УЭЦН через уплотнительный узел инерционный сепаратор механических примесей, осуществляющий отделение от потока и сброс в зумпф скважины крупных частиц песка. Прошедшая предварительную очистку скважинная жидкость, минуя уплотнительный узел, подается на вход ЭЦН, где в качестве входного модуля используется входной фильтр с тонкостью очистки 0,2 мм (200 мкм). При этом следует учитывать, что на входной фильтр подается жидкость с существенно сниженной концентрацией механических примесей, что положительно сказывается на времени его наработки в скважине. На случай кольматации фильтроэлемента в конструкции входного фильтра УЭЦН могут быть предусмотрены предохранительные клапаны (рисунок 9), открывающиеся при перепаде давления  $\Delta P > 0,3$  атм. Таким образом, обеспечивается подача скважинной жидкости на вход ЭЦН, минуя засоренный фильтроэлемент.

Автором предложен вариант конструкции самоочищающегося фильтра (рисунок 10), который состоит из перфорированной трубы 1 с подшипниковыми узлами 2 и валом 3. На нижнем конце трубы посредством винта 4 закреплен неподвижный упор 5, а на верхнем конце трубы расположен подвижный упор 6, который с помощью винта 7 соединен с упругим элементом 8, опирающимся на внутреннюю поверхность обсадной колонны 9, например, в виде манжеты, и крышкой упора 10. В крышку упора ввинчен ограничительный винт 11, конец которого входит в паз 12, выполненный на перфорированной трубе 1. Коаксиально трубе 1 расположена возвратная пружина 13, опирающаяся одним своим концом на крышку упора 10, а другим на опорную втулку 14 так же закрепленную на перфорированной трубе 1 винтом 15. Упоры 5 и 6 имеют конические опорные поверхности, к которым прилегают своими косыми торцами стержни 16 фильтроэлемента. Стержни 16 фильтроэлемента закреплены на кольцевых профилированных пружинах 17, например, посредством точечной сварки, таким образом, что между ними образуются щели заданного размера 18.

Под действием избыточного давления внутри колонны НКТ (на рисунке не показана) происходит ее упругое растяжение, в результате чего фильтр вместе с компоновкой УЭЦН перемещается к забою скважины. При снижении давления внутри колонны НКТ, например, при остановке работы УЭЦН, колонна сжимается, что приводит к перемещению фильтра и УЭЦН к устью скважины. При движении фильтра вверх, сила трения  $F_{тр}$ , возникающая между упругим элементом 8 и стенкой обсадной колонны 9, препятствует движению связанного с упругим элементом 8 подвижного упора 6, вследствие чего последний остается на месте. Жестко закрепленный на перфорированной трубе 1 фильтра неподвижный упор 5 сближается с подвижным упором 6, при этом возвратная пружина 13 упруго деформируется (сжимается) запасая энергию. Благодаря сближению упоров, вдоль их конических опорных поверхностей происходит радиальное движение стержней 16 фильтроэлемента, при этом размер щелей 18 увеличивается. Вместе со стержнями 16 фильтроэлемента в радиальном направлении также растягиваются (упруго деформируются) кольцевые профилированные пружины 17. После самоочистки, за счет запасенной возвратной пружиной 13 энергии упругой деформации подвижный упор 6 отдалеяется от неподвижного упора 5 и возвращается в исходное положение, при этом стержни 16 фильтроэлемента так же возвращаются в исходное положение за счет энергии упругой деформации, запасенной кольцевыми профилированными пружинами 17.

Деформация НКТ достигается посредством изменения давления  $P_{уст}$  на устье скважины. НКТ деформируется на величину  $\Delta$ , которая рассчитывается по формуле (4)

$$\Delta = \frac{L^2}{20E} [\gamma - 2\gamma_{ж} (1 - \mu_{п})] + \frac{(1 - 2\mu_{п}) F_{пр} L P_{уст}}{EF} \cdot 10^3, \quad (4)$$

где  $\Delta$  – величина деформации колонны НКТ, м;  $L$  – длина колонны НКТ, м;  $E$  – модуль упругости материала труб НКТ, МПа;  $\mu_{п}$  – коэффициент Пуассона материала труб НКТ;  $\gamma$  – удельный вес труб НКТ, Н/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{ж}$  – удельный вес жидкости в НКТ, Н/м<sup>3</sup>;  $F_{пр}$  – площадь проходного канала труб НКТ, м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь кольцевого поперечного сечения труб НКТ, м<sup>2</sup>;  $P_{уст}$  – давление на устье скважины, МПа.

Расчет деформации труб НКТ по формуле (4) выполнен при следующих условиях: трубы из стали 30ХМА (аналоги 25CrMo4,

34CrMo4) диаметром 73 мм и толщиной 5,5 мм. Длина колонны труб  $L = 1000$  м, модуль упругости  $E = 2,12 \cdot 10^5$  МПа и коэффициент Пуассона  $\mu_P = 0,3$ . Площадь проходного канала труб  $F_{пр} = 30,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>, площадь кольцевого поперечного сечения труб  $F = 11,7 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>. При изменении  $P_{уст}$  от 0 до 4 МПа значение деформации колонны НКТ составит  $\Delta = 0,02$  м. При перемещении компоновки УЭЦН на  $\Delta = 0,02$  м происходит восстановление проницаемости фильтроэлемента. Регулярное проведение очисток фильтроэлемента обуславливает увеличение продолжительности работы фильтра в скважине и повышение наработки УЭЦН.

**3. Предотвращение перерезания корпусов скважинного насосного оборудования с вращающимися роторами, входящего в компоновки УЭЦН и работающего в условиях перекачивания жидкости с высоким содержанием абразивных частиц песка, обеспечивается на этапе конструирования посредством включения в состав насосного оборудования элементов, реализующих срыв подачи скважинной жидкости при интенсивном развитии гидроабразивного изнашивания в экспериментально определенных зонах его локального развития.**

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что гидроабразивный износ насосов и предвключенных устройств (например, газосепараторов) УЭЦН развивается не равномерно и имеет преимущественно локальный характер. С высокой долей вероятности зонами наиболее интенсивного локального износа являются области изменения скорости течения потока жидкости, где формируются условия для накопления частиц механических примесей в жидкости (рисунок 11). Предупреждение тяжелых последствий аварийных отказов (полетов) элементов УЭЦН возможно посредством автоматического срыва подачи жидкости при интенсивном развитии гидроабразивного изнашивания.

Рассмотрим реализацию предлагаемого подхода на примере модернизации центробежного газосепаратора УЭЦН. На основе компьютерного моделирования или проведения экспериментальных исследований процесса функционирования газосепаратора УЭЦН, перекачивающего газожидкостную смесь с высоким содержанием механических примесей, выявляются зоны интенсивного локального

гидроабразивного изнашивания защитной гильзы (см. рисунок 11). После обнаружения зон локализации гидроабразивного износа, на корпусе газосепаратора выполняют отверстия или пазы напротив этих зон (рисунок 12), защитная гильза при этом может быть набранной из сегментов, а не выполняться цельной. При промывке защитной гильзы абразивом внутренняя полость газосепаратора соединяется с затрубным пространством через отверстия в корпусе. Поток перекачиваемой жидкости вместе с механическими примесями отводится в затруб, при этом работа газосепаратора будет нарушена. На вход насоса будет поступать скважинная жидкость с высоким содержанием свободного газа, что приведет к срыву подачи и остановке УЭЦН. Вместе с тем будет предотвращено полное перерезание корпуса газосепаратора и минимизирована вероятность полёта части УЭЦН в скважину. Указанное позволит избежать существенных затрат, связанных с устранением последствий тяжелого аварийного отказа. Оборудование, отказавшее по срыву подачи, будет извлечено из скважины, для проведения дефектации и ремонтно-восстановительных мероприятий. Прочностной расчет, выполненный для условий приведенных в Таблице 1, показал, что запас прочности корпуса модернизированного газосепаратора ГС-5А на растяжение составил 63 раза (рисунок 13).

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе на основании выполненных автором исследований решена актуальная задача повышения эффективности эксплуатации нефтяных пескопроявляющих скважин посредством обоснования технико-технологических решений снижения интенсивности и предотвращения негативных последствий гидроабразивного изнашивания рабочих органов оборудования УЭЦН.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Исследован процесс эксплуатации пескопроявляющих скважин с использованием УЭЦН. Показано, что гидроабразивное изнашивание обуславливает кратное снижение наработки УЭЦН в нефтяных скважинах.

2. Выполнен анализ литературных источников и проведены теоретические исследования процесса гидроабразивного изнашивания рабочих органов оборудования УЭЦН. Показано, что процесс

гидроабразивного изнашивания рабочих органов оборудования УЭЦН носит локальный характер, а выявление зон локального износа возможно при проведении стендовых испытаний.

3. Выполнены экспериментальные исследования процесса гидроабразивного изнашивания рабочих органов оборудования УЭЦН. Доказано, что при прохождении через рабочие ступени электроцентробежных насосов с потоком перекачиваемой жидкости частицы кварцевого песка интенсивно измельчаются при этом увеличивается их абразивность и изнашивающая способность по отношению к межступенчатым уплотнениям и опорным шайбам рабочих колес ЭЦН.

4. Предложены компоновочные схемы устройств очистки флюида пескопроявляющих скважин. Разработаны варианты конструкций и обоснованы параметры самоочищающихся фильтров УЭЦН. Доказано, что восстановление проницаемости фильтроэлементов возможно посредством преобразования возвратно-поступательного перемещения компоновки УЭЦН при деформации колонны НКТ в скважине.

5. Предложен способ реализации автоматического срыва подачи УЭЦН в процессе перекачки скважинной жидкости с высоким содержанием частиц песка при интенсивном развитии гидроабразивного износа и высокой вероятности фрагментарного разрушения узлов УЭЦН.

6. Результаты диссертации использованы сотрудниками ООО «НСХ АЗИЯ ДРИЛЛИНГ» (г. Пермь) при разработке методики обоснования рациональных параметров и конструкций скважинных фильтров; применяются ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» при обучении студентов по направлению подготовки 21.05.06 «Нефтегазовая техника и технология» по специальности «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений».

7. Перспективным направлением развития темы исследования является обоснование способов восстановления проницаемости объемных фильтроэлементов скважинных и входных фильтров УЭЦН с целью повышения межремонтного периода скважин, осложненных пескопроявлением.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Коротков, Ю. Г. Повышение надежности газосепараторов, применяемых в условиях добычи абразивсодержащих скважинных жидкостей / **Ю. Г. Коротков**, Д. И. Шишлятников // Нефтегазовое дело. – 2025. – Т.23. – №1. – С. 1-10.

2. Шишлятников, Д.И. Повышение эффективности очистки оборотной воды на нефтяных промыслах / Д.И. Шишлятников, В.К. Картавец, **Ю.Г. Коротков**, А.А. Иванченко, Д.И. Дремина // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2025. – №5(389). – С. 54-60.

3. Шишлятников, Д. И. Повышение наработки скважинных насосных установок в условиях добычи нефти с высоким содержанием механических примесей / Д. И. Шишлятников, **Ю. Г. Коротков**, Д. Н. Лебедев, А. А. Иванченко, С. А. Фролов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2022. – № 5(353). – с. 29-35.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

4. Шишлятников, Д. И. Оценка изменения абразивности частиц механических примесей, содержащихся в жидкостях, перекачиваемых установками скважинных насосов / Д. И. Шишлятников, **Ю. Г. Коротков**, А. А. Иванченко, Д. И. Дремина, В. К. Картавец // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – №7. – с. 125-141.

*Патенты:*

5. Патент 2811164 Российская Федерация, МПК E21B 43/08 (2006.01). Щелевой фильтр: № 2023114026; заявлено 30.05.2023; опубликовано 11.01.2024 / В. К. Картавец, Д. И. Шишлятников, В. Ю. Зверев, **Ю. Г. Коротков**, В. И. Шишлятников, О. И. Свольская; заявитель ПНИПУ. Бюл. № 2. – 12 с.

6. Патент на полезную модель 232200 Российская Федерация, МПК E21B 43/08 (2006.01). Щелевой фильтр: № 2025101563; заявлено 27.01.2025; опубликовано 28.02.2025 / Д. И. Шишлятников, **Ю. Г. Коротков**, Д. И. Ситников, И. Х. Тюбеев, В. К. Картавец; заявитель ПНИПУ. Бюл. № 7. – 9 с.

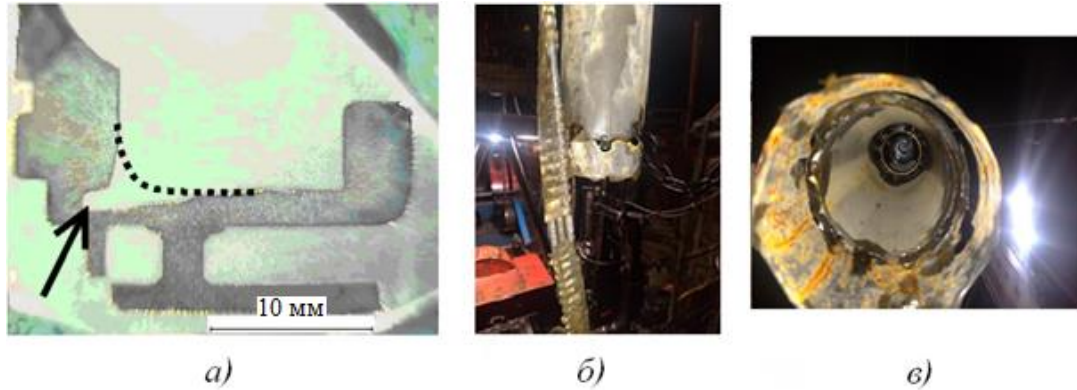


Рисунок 1 – Гидроабразивный износ направляющего аппарата (а) и последствия перерезания корпусов электроцентробежных насосов (б, в)

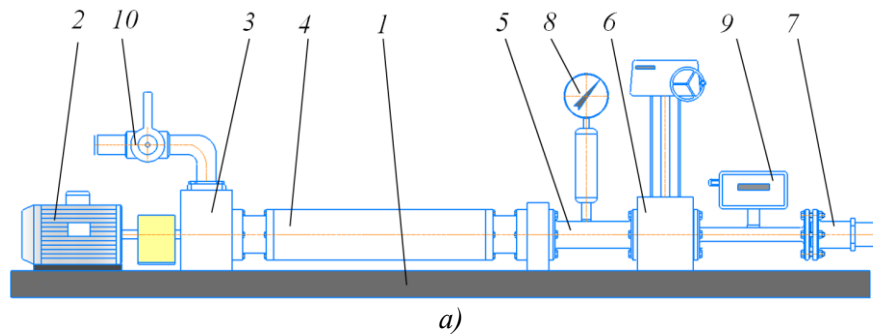


Рисунок 3 – Схема (а) и общий вид (б) лабораторного стенда для исследования процесса гидроабразивного изнашивания рабочих ступеней ЭЦН

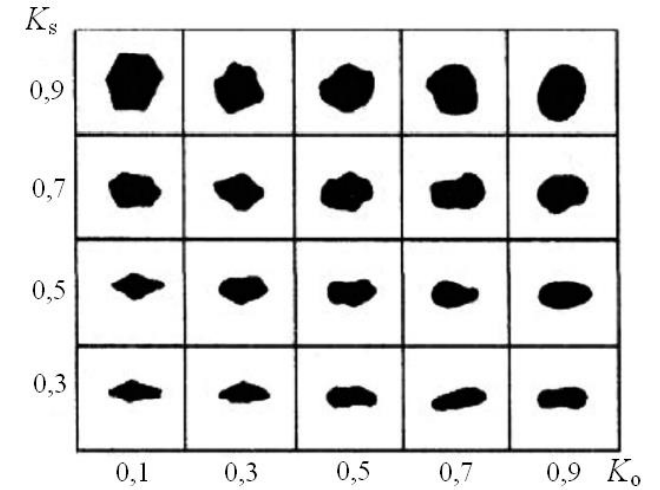


Рисунок 2 – Диаграмма Крумбьена-Шлосса для визуального определения коэффициентов округлости  $K_0$  и сферичности  $K_s$  твердых частиц механических примесей

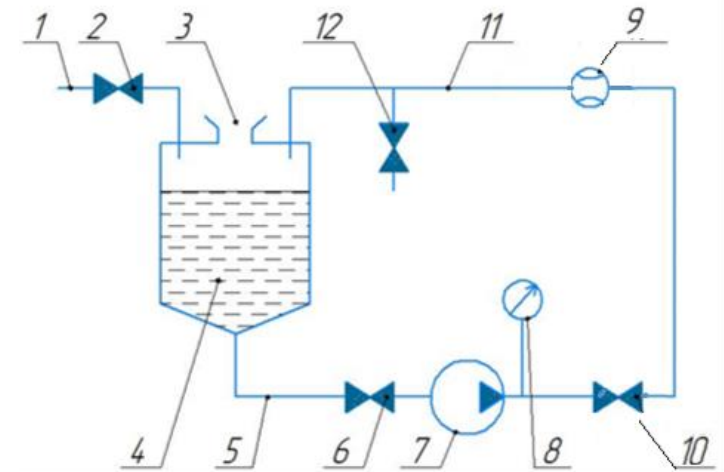


Рисунок 4 – Гидравлическая схема лабораторного стенда для исследования процесса гидроабразивного изнашивания рабочих ступеней ЭЦН

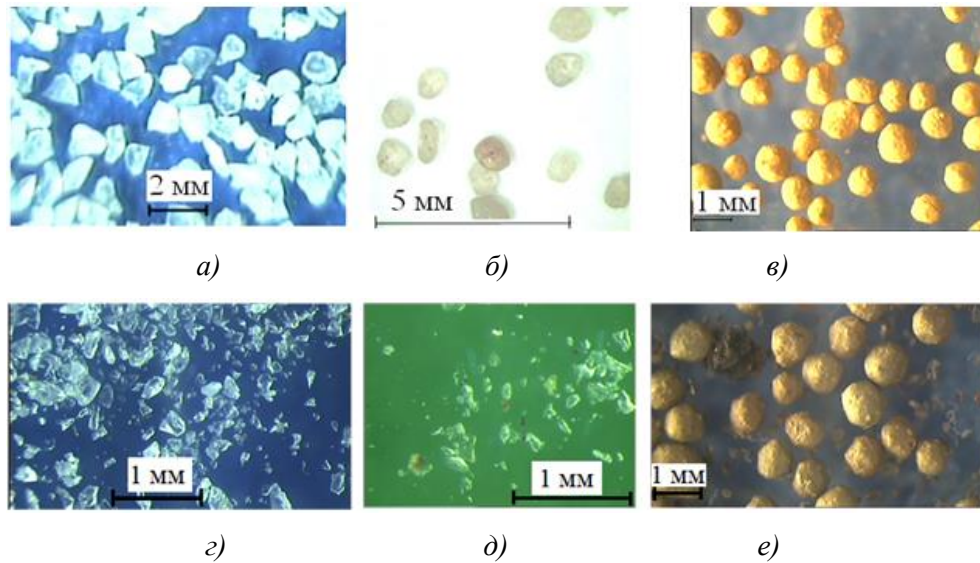


Рисунок 5 – Форма частиц и гранулометрический состав модельных механических примесей: *a, б, в* – исходные форма и состав; *г, д, е* – после прохождения через 80 рабочих ступеней ЭЦН7А-150; *а, г* – частицы кварцевого песка искусственного происхождения; *б, д* – частицы кварцевого песка естественного происхождения; *в, е* – проппант

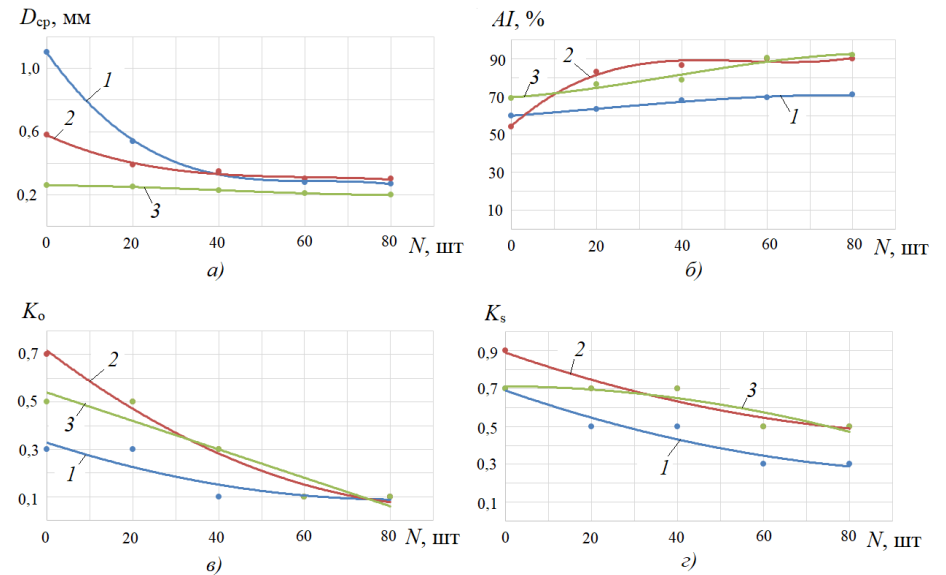


Рисунок 6 – Изменение среднего диаметра (*a*), показателя абразивности (*б*), коэффициента округлости (*в*) и коэффициента сферичности (*г*) частиц, содержащихся в смеси, при прохождении через ступени ЭЦН7А-150: *1* – кварцевый песок искусственного происхождения  $D_{с.н} = 1,1$  мм; *2* – кварцевый песок естественного происхождения  $D_{с.н} = 0,58$  мм; *3* – кварцевый песок естественного происхождения  $D_{с.н} = 0,26$  мм

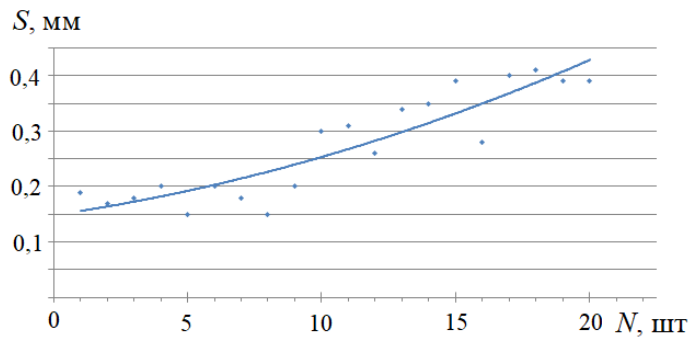
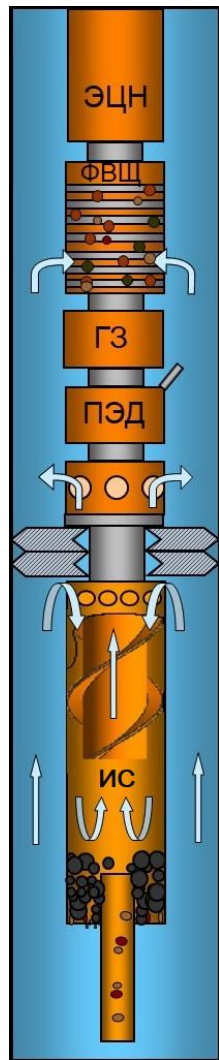
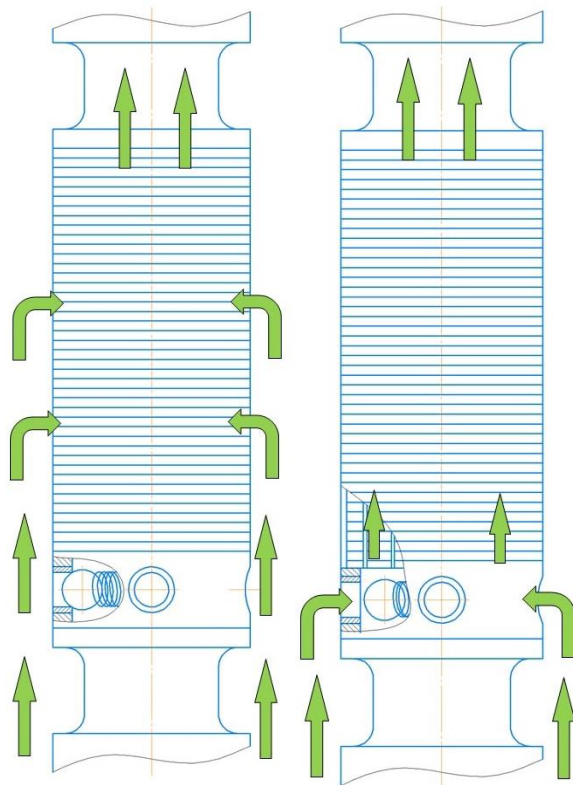


Рисунок 7 – Изменение интенсивности изнашивания опорных шайб  $S$  рабочих колес ступеней ЭЦН7А-150 в зависимости от положения в испытываемой насосной секции



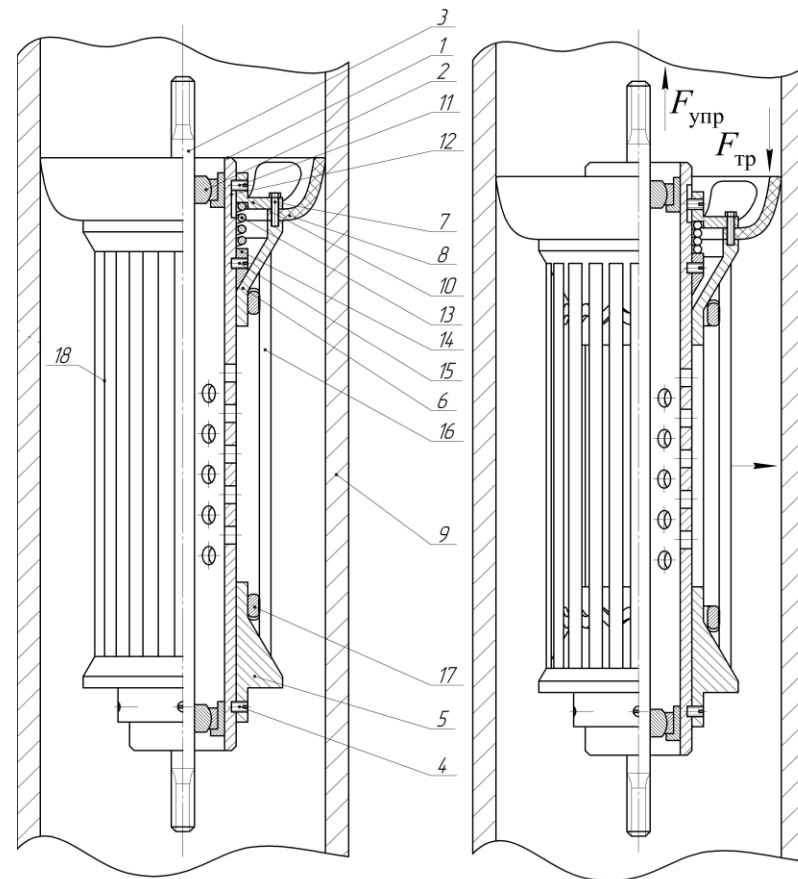
ЭЦН – электроцентробежный насос;  
 ФВЩ – фильтр входной щелевой;  
 ГЗ – гидрозашита;  
 ПЭД – погружной электродвигатель;  
 ИС – инерционный сепаратор

Рисунок 8 – Компоновка УЭЦН в скважине с каскадной системой очистки скважинной жидкости от механических примесей



*a)* *б)*

Рисунок 9 – Входной фильтр УЭЦН с предохранительными клапанами: *a* – предохранительные клапаны закрыты, жидкость поступает к насосу через фильтроэлемент; *б* – предохранительные клапаны открыты, жидкость поступает к насосу минуя засоренный фильтроэлемент



*a)* *б)*

Рисунок 10 – Принципиальная схема входного щелевого самоочищающегося фильтра УЭЦН с вертикальными щелями: *a* – рабочее положение фильтроэлемента; *б* – положение фильтроэлемента при очистке



Рисунок 11 – Изменение интенсивности изнашивания по длине защитной гильзы центробежного газосепаратора конструкции П.Д. Ляпкина

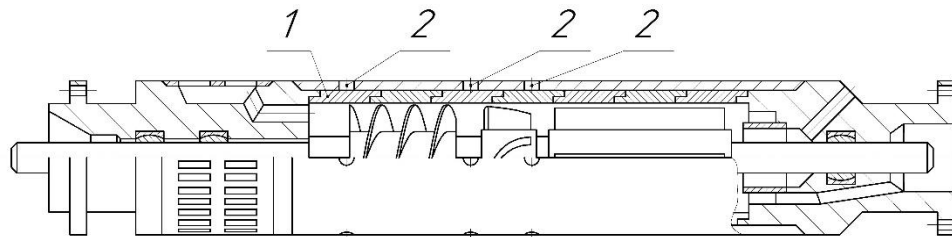


Рисунок 12 – Модернизированный центробежный газосепаратор конструкции П.Д. Ляпкина:

1 – защитная гильза из сегментов; 2 – отверстия в корпусе

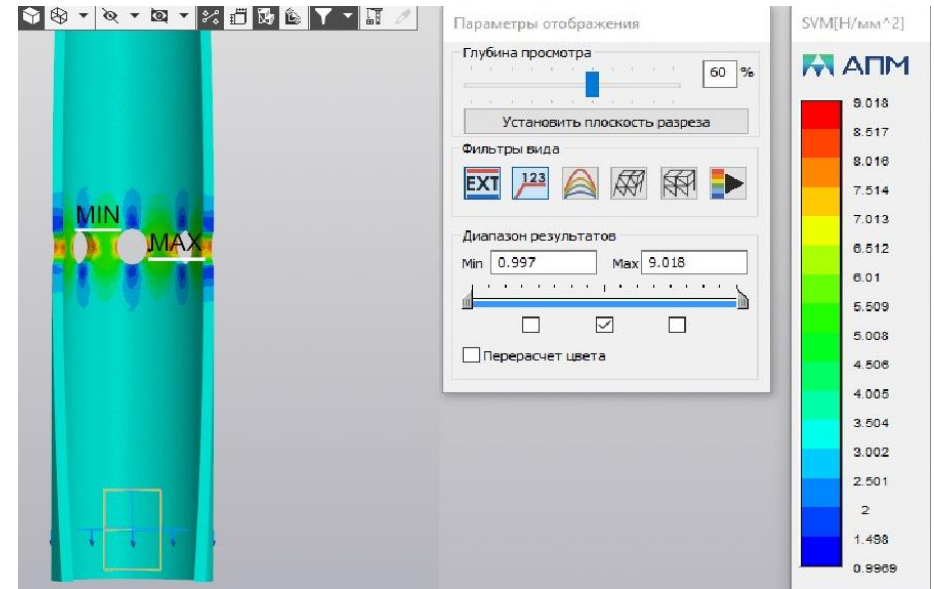


Рисунок 13 – Результаты прочностного расчета корпуса модернизированного газосепаратора ГС-5А в программной среде «Компас-3D»

Таблица 1 – Исходные данные для прочностного расчета модернизированного корпуса газосепаратора ГС-5А

Параметр	Ед. изм.	Значение
Масса погружного электродвигателя УЭЦН	кг	560
Масса гидрозащиты	кг	75
Толщина стенки корпуса ГС-5А	мм	6,5
Наружный диаметр корпуса ГС-5А	мм	103
Материал корпуса ГС-5А	-	Сталь 40
Количество отверстий в корпусе ГС-5А	шт.	8
Диаметр отверстия	мм	20