

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА
им. И.М.ГУБКИНА
(РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина

А.В.Мурадов



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
по теме № 444-01/13-09/ ЭМ-01/01-09

«Проведение контроля качества силикатно-эмалевого покрытия НКТ»

Декан факультета инженерной
механики, к.т.н., профессор


А.К. Прыгаев

Заведующий кафедрой машин и
оборудования нефтяной и газовой
промышленности, д.т.н., профессор


В.Н. Ивановский

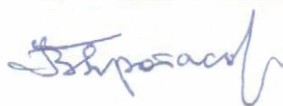
Руководитель темы, д.т.н., профессор


В.Н. Протасов

Москва 2009

ИСПОЛНИТЕЛИ

Руководитель работы,
проф., д.т.н.



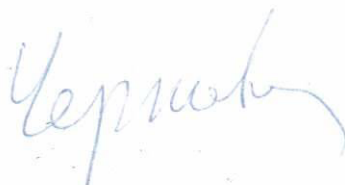
В.Н.Протасов

Ответственный исполнитель,
с.н.с., к.т.н.



М.Г.Степанский

Старший научный сотрудник,
доцент, к.т.н.



Т.А.Чернова

Научный сотрудник



А.В.Макаренко

РЕФЕРАТ

по теме № 444-01/13-09/ ЭМ-01/01-09

Наименование темы:

«Проведение контроля качества силикатно-эмалевого покрытия НКТ»

Отчет с., 1 кн., табл. , рис. прил.

ПОКРЫТИЕ ВНУТРЕННЕЕ, СИЛИКАТНО-ЭМАЛЕВОЕ, НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫЕ ТРУБЫ, ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ, ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ПОКАЗАТЕЛИ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЯ, АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЯ.

Цель исследований – соответствие фактического качества внутреннего силикатно-эмалевого покрытия насосно-компрессорных труб (НКТ) назначению этого покрытия, включающего в себя функции выполняемые покрытием, показатели выполнения этих функций, условия применения покрытия и регламентированный срок его службы.

Качество покрытия оценивали по следующим показателям его свойств:

- внешнему виду в исходном состоянии и после различных видов внешнего воздействия, моделирующих реальные воздействия на НКТ с покрытием на разных стадиях их жизненного цикла;
- толщине;
- адгезионной прочности в исходном состоянии и после длительного воздействия модельных сред, имитирующих наиболее агрессивные по отношению к покрытию компоненты эксплуатационной среды, включая действие водорода, образующегося при эксплуатации НКТ с покрытием в сероводородсодержащих скважинах;

- переходному сопротивлению в исходном состоянии и после длительного воздействия минерализованной водной среды при повышенной температуре;
- диэлектрической сплошности в исходном состоянии и после различных видов внешнего воздействия, имитирующих реальные воздействия на НКТ с покрытием на разных стадиях их жизненного цикла;
- удельной силе сцепления с твердыми отложениями смолопарафинов и минеральных солей, сформированными на поверхности покрытия;
- износостойкости в паре трения со штанговой муфтой.

Оглавление

	Стр.
Введение.....	6
1. Исследование адгезионной прочности силикатно-эмалевого покрытия в исходном состоянии и после длительного воздействия минерализованной водной среды и электрохимического наводороживания.....	7
1.1. Методика исследования.....	7
1.2. Результаты исследования.....	14
2. Исследование диэлектрической сплошности силикатно-эмалевого покрытия в исходном состоянии, после воздействия контактной нагрузки и после длительного контакта с минерализованной водной средой при повышенной температуре с последующим воздействием контактной нагрузки.....	21
2.1. Методика исследования.....	21
2.2. Результаты исследования.....	25
3. Исследование внешнего вида и переходного сопротивления силикатно-эмалевого покрытия в исходном состоянии и после длительного воздействия минерализованной водной среды при повышенной температуре.....	25
3.1. Методика исследования.....	25
3.2. Результаты исследования.....	28
4. Исследование удельной силы сцепления силикатно-эмалевого покрытия с твердыми отложениями смолопарафинов и минеральных солей, сформированными на поверхности покрытия.....	29
4.1. Методика исследования.....	29
4.2. Результаты исследования.....	31
5. Исследование износостойкости силикатно-эмалевого покрытия в паре трения со штанговой муфтой.....	32
5.1. Методика исследования.....	32
5.2. Результаты исследования.....	37
6. Заключение.....	38
7. Литература.....	39

Введение

Колонны НКТ являются одним из наиболее ответственных элементов скважинного оборудования, от безаварийной работы которых зависит себестоимость добычи нефти и газа.

Колонны НКТ в скважинах помимо основной функции - подъема продукции скважины на поверхность, выполняют ряд других не менее важных функций: транспортирование в скважину технологических сред; подвеска в скважине оборудования для выполнения ряда технологических операций; проведение в скважине ремонтных работ.

В процессе эксплуатации НКТ подвергаются интенсивной электрохимической коррозии, коррозионному и сульфидному растрескиванию, образованию твердых отложений минеральных солей и асфальтосмолопарафинов (АСП) на их внутренней поверхности. При эксплуатации скважин УСШН НКТ подвержены коррозионно-механическому износу в паре трения с муфтой насосных штанг и центраторов. Вышеуказанные процессы обуславливают частые отказы или низкую эффективность работы НКТ.

Накопленный в нефтегазовой отрасли опыт показывает, что одним из эффективных направлений предотвращения или торможения указанных процессов является нанесение на внутреннюю поверхность НКТ защитных покрытий. При этом эффективность и надежность НКТ с внутренним покрытием в значительной мере определяется правильным выбором материала покрытия. Одним из распространенных видов внутреннего покрытия НКТ являются силикатно-эмалевые покрытия. Многообразие условий эксплуатации НКТ с силикатно-эмалевым покрытием в добывающих и нагнетательных скважинах обуславливает разнообразные требования к этому покрытию как по выполняемым им функциям, так и по сопротивлению разрушению в течение регламентированного срока службы при различных видах внешнего воздействия.

Это обуславливает необходимость проведения системных исследований соответствия фактического качества внутреннего силикатно-эмалевого покрытия НКТ назначению этого покрытия, т.е. его способности выполнять различные функции в разнообразных условиях применения в течение регламентированного срока службы. Данные исследования позволят выявить наиболее эффективную область применения НКТ с внутренним силикатно-эмалевым покрытием.

Результаты проведенных исследований содержатся в данном отчете.

Исследования проведены в соответствии с календарным планом к договору по теме № 444-01/13-09/ ЭМ-01/01-09 в полном объеме.

1. Исследование адгезионной прочности силикатно-эмалевого покрытия в исходном состоянии и после длительного воздействия минерализованной водной среды и электрохимического наводороживания.

1.1. Методика исследования

Контроль адгезионной прочности внутреннего покрытия НКТ в исходном состоянии, после воздействия модельной среды и после электрохимического наводороживания проводили на образцах типа сегментов, вырезанных из НКТ с внутренним силикатно-эмалевым покрытием, методом отрыва стального грибка, приклеенного к поверхности покрытия (рис.1). Образцы были изготовлены ЗАО ТД «Капстрой».

При контроле влияния модельной среды на адгезионную прочность покрытия на поверхности покрытия образца перед испытаниями в модельной среде были выделены контролируемые участки размером 10 x 20 мм, которые были окантованы по периметру канавкой шириной 2 мм, прорезанной до металла (рис.2).

Испытания образцов в модельной среде проводили на двух базах времени испытаний 70 суток и 100 суток при температуре плюс 130⁰С и давлении среды 10,0 МПа. В качестве модельной среды использовался 3%

ный водный раствор NaCl, имитирующий пластовую воду, содержащуюся в продукции добывающих скважин и являющуюся наиболее активной средой по отношению к адгезионным связям покрытия со сталью.

Использование образцов с покрытием, имеющим искусственные дефекты по границам контролируемых участков, позволяло обеспечить ускоренное проникновение модельной среды к границе раздела покрытие-металл и, как результат этого, объективно оценить устойчивость адгезионных связей в модельной среде на ограниченной базе времени испытаний в лабораторных условиях.

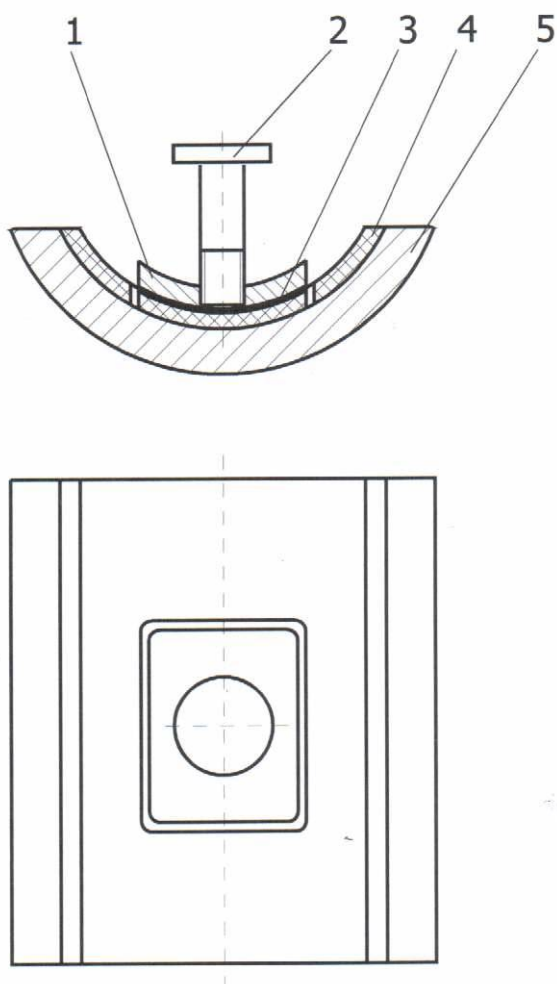


Рис.1. Схема клеевого соединения грибка с покрытием
 1- грибок; 2-хвостовик; 3-клеевой слой; 4-покрытие; 5-сегмент из НКТ

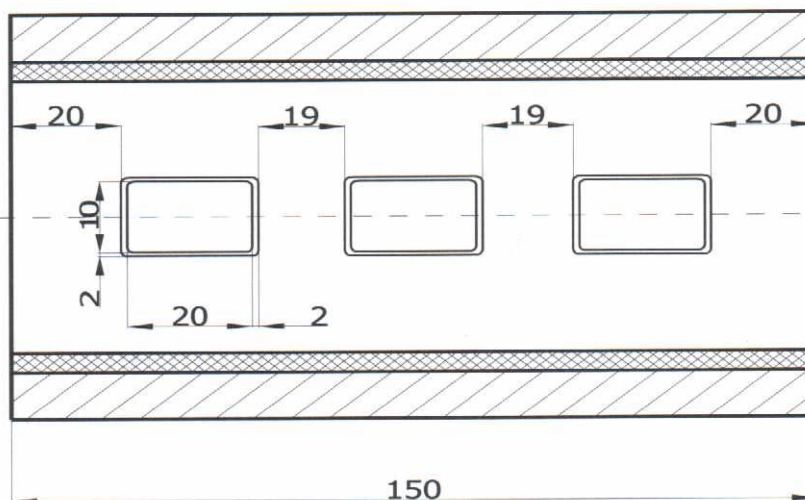


Рис. 2. Схема образца для контроля адгезии покрытия НКТ

Необходимость создания искусственных дефектов при контроле адгезии покрытия в активной модельной среде была обусловлена тем, что в реальных условиях эксплуатации НКТ с покрытием высока вероятность образования локального сквозного дефекта в покрытии, что может привести к быстрому отслаиванию покрытия на всей поверхности НКТ при недостаточной устойчивости в эксплуатационной среде адгезионных связей покрытия со сталью.

Испытания образцов в условиях комплексного воздействия модельной среды, повышенной температуры и давления проводили в автоклаве (рис.3).

В рабочую камеру автоклава устанавливали образцы, после чего камеру заполняли 3%-ным водным раствором NaCl и создавали в автоклаве требуемые значения давления и температуры. После выдержки образцов на базах времени 20, 40, 70 и 100 сут сбрасывали давление в рабочей камере автоклава, охлаждали модельную среду до комнатной температуры, извлекали образцы из автоклава, протирали их фильтровальной бумагой. Затем к выделенному кольцевой канавкой участку покрытия приклеивали грибок (рис.1). В качестве грибка использовали сегмент, вырезанный из НКТ

без покрытия. того же диаметра, что и НКТ, из которой был вырезан образец с испытываемым покрытием, для обеспечения минимального зазора в сопряжении грибка с поверхностью покрытия. Размеры грибка соответствовали размерам участка покрытия, выделенного кольцевой канавкой.

В средней части грибка имеется резьбовое отверстие для крепления хвостовика, используемого для отрыва грибка от покрытия.

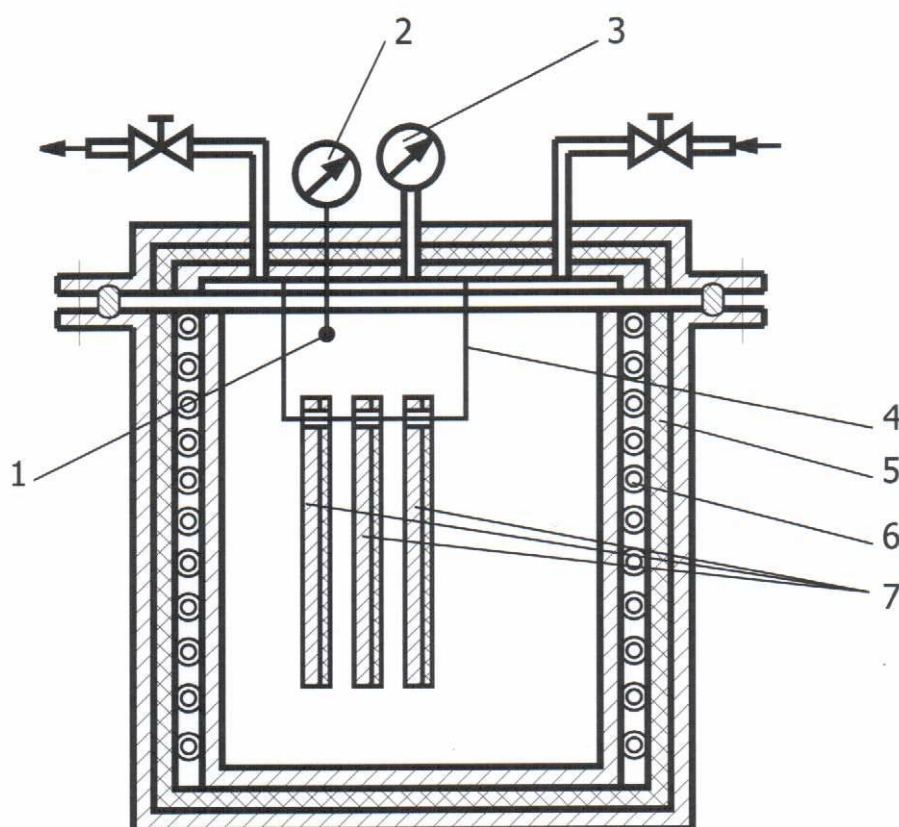


Рис.3. Автоклав для испытаний внутреннего покрытия НКТ в условиях комплексного воздействия модельной среды, повышенной температуры и давления

1 – термопара; 2 – потенциометр; 3 – манометр; 4 - подвеска образцов;
5 -автоклав с модельной средой; 6 – электроспираль; 7 - образцы с покрытием

Образец, с приклеенным грибком устанавливали в приспособление (рис. 4) и закрепляли хвостовик грибка в специальном зажиме, после чего зажимали хвостовики приспособления и специального зажима в зажимах

разрывной машины. Механические испытания на отрыв проводили при скорости перемещения подвижного зажима разрывной машины 10 мм/мин. При этом контролировали величину усилия отрыва и характер разрушения покрытия при отрыве.

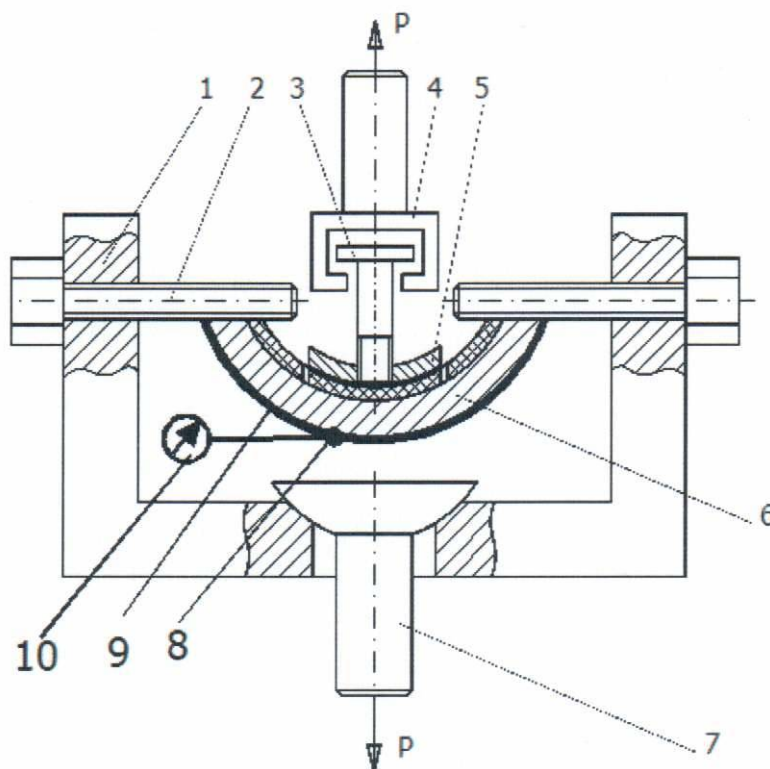


Рис. 4. Схема контроля адгезии покрытия методом отрыва грибка
 1 – скоба; 2 – винт упорный; 3 – хвостовик ; 4, 7 - захваты; 5 – грибок; 6 – сегмент НКТ с покрытием; 8 – термопара; 9 – электронагревательная плита; 10 - потенциометр

При отрыве грибка возможны следующие виды разрушения: адгезионное разрушение покрытия, т.е. его полное отслаивание от металла (100% Ад), когезионное разрушение, т.е. разрушение по материалу покрытия (100% К), частичное отслаивание от металла и частичное разрушение по материалу покрытия (...% Ад,% К), частичное разрушение по материалу покрытия и частичное по клеевому слою, соединяющему грибок с покрытием (% К, %Кл), разрушение по материалу клеевого слоя (100% Кл)..

При контроле влияния электрохимического наводороживания на адгезионную прочность покрытия на поверхности покрытия образца перед электрохимическим наводороживанием выделяли контролируемый участок

размером 15 x 20 мм, который окантовывали канавкой шириной 2 мм, прорезанной до металла (рис.5).

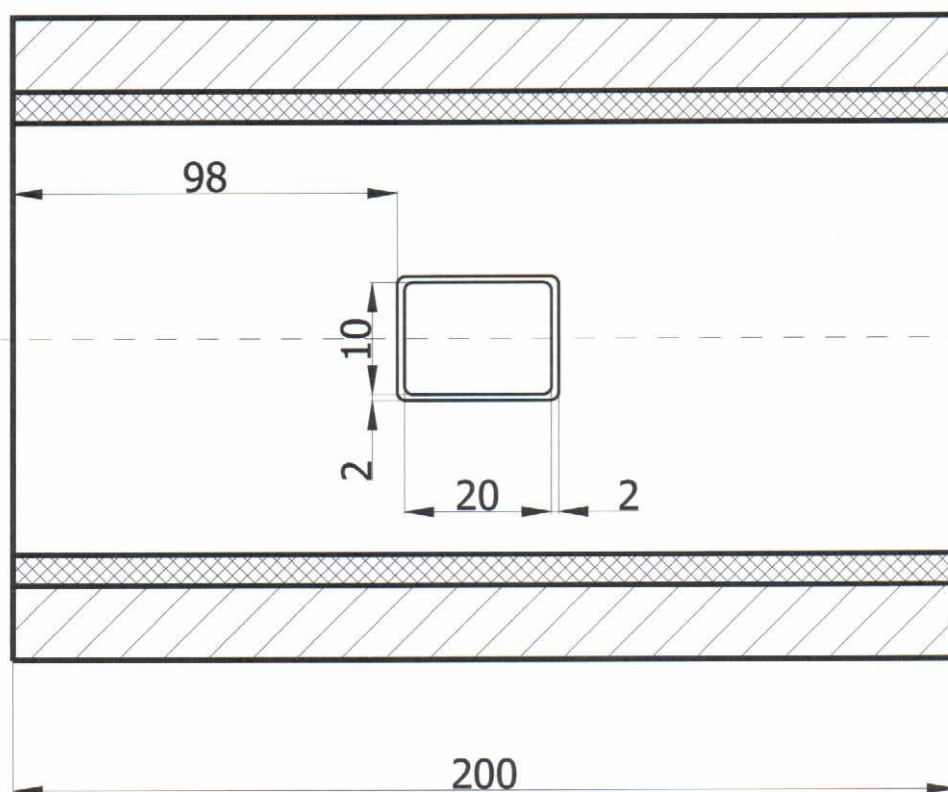


Рис.5. Схема образца для контроля адгезии покрытия НКТ при электрохимическом наводороживании

Для проведения электрохимического наводороживания на покрытие образца устанавливали рабочую камеру ячейки для катодной поляризации симметрично относительно контролируемого участка покрытия и заливали в камеру 3%-ный водный раствор NaCl (рис. 6). При этом поверхность покрытия, находящаяся в контакте с электролитом, должна быть не менее 232 см^2 . Расстояние между образцом и анодом должно быть не менее 38 мм. Расстояние между уровнем электролита и поверхностью покрытия должно составлять 50 мм. Для нагрева минерализованной водной среды в рабочей камере до требуемой температуры включали нагревательную электроплиту и осуществляя контроль с помощью термопары, и поддерживая с помощью реле стабильно эту температуру.

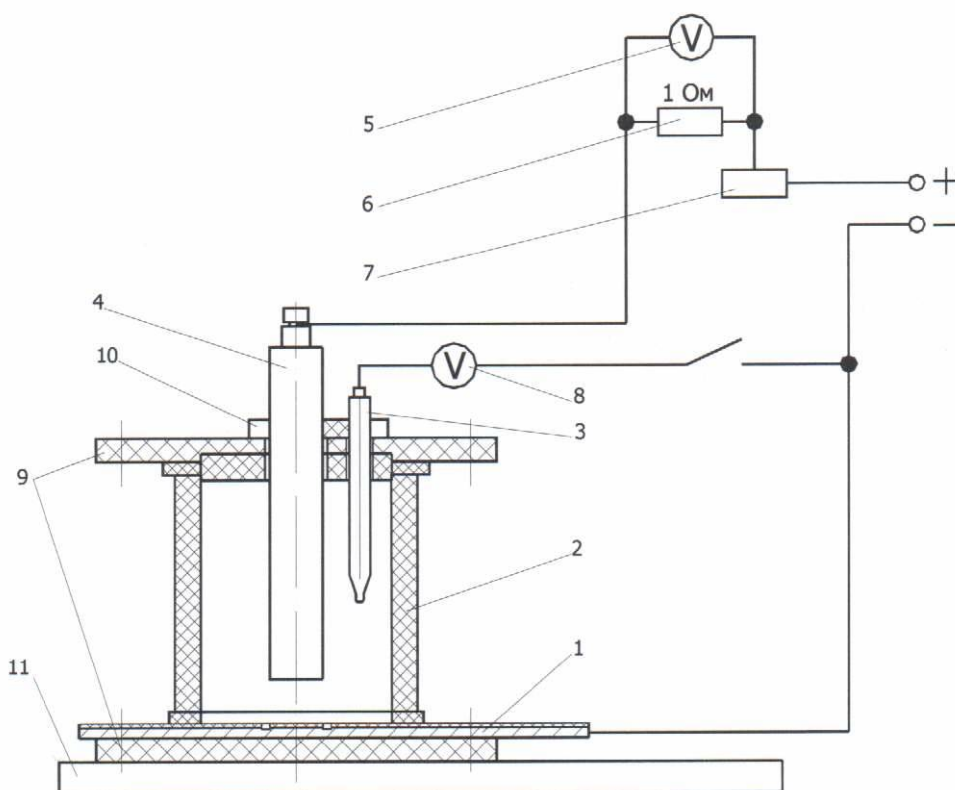


Рис.6. Схема испытания покрытия при электрохимическом наводороживании с последующим контролем адгезии методом отрыва грибка

1 – образец; 2 – камера рабочая; 3 – электрод сравнения стандартный ГОСТ 17792; 4 – электрод графитовый (анод); 5,8 – вольтметр; 6 – эталонное сопротивление; 7 – реостат; 9 – фланец; 10 - держатель электрода; 11 – электроплита нагревательная

Образец 1 подключали к отрицательному полюсу источника постоянного тока. Графитовый электрод 4 соединяли последовательно с эталонным сопротивлением (1,0 Ом) 6, реостатом 7 и положительным полюсом источника постоянного тока. Вольтметр 8 подключали параллельно эталонному сопротивлению 6. Управляя реостатом 7 и контролируя показания вольтметра 8, устанавливали потенциал на образце минус 1,5 В. После этого отключали вольтметр 8 и фиксировали время начала испытаний образца в условиях катодной поляризации при заданной температуре. Электрохимическое наводороживание проводили на базах времени испытаний 30 и 50 сут. с контролем заданных значений потенциала и температуры каждые 24 ч. и с периодической заменой электролита каждые 7

суток. По окончании заданной базы испытаний образец демонтировали и протирали фильтровальной бумагой для удаления остатков минерализованной водной среды. Затем обрабатывали шлифовальной шкуркой поверхность участка покрытия внутри кольцевой канавки, прорезанной до металла, обезжиривали обработанный участок покрытия и рабочий торец грибка ацетоном, наносили на обе обезжиренные поверхности тонкий слой клея, устанавливали грибок сразу же на покрытую клеем поверхность покрытия соосно с кольцевой канавкой (рис. 1) и проводили отверждение клеевого слоя при режимах, указанных в инструкции по применению клея. Образец с приклеенным грибком устанавливали в приспособление (рис. 4) и закрепляли хвостовик грибка в специальном зажиме, после чего зажимали хвостовики приспособления и специального зажима в зажимах разрывной машины. Механические испытания на отрыв проводили при скорости перемещения подвижного зажима разрывной машины 10 мм/мин. При этом контролировали величину усилия отрыва и характер разрушения покрытия при отрыве.

1.2. Результаты исследования

В табл. 1 приведены результаты исследования адгезионной прочности внутреннего силикатно-эмалевого покрытия НКТ в исходном состоянии и после воздействия 3%-ного водного раствора NaCl на различных базах времени. Толщина покрытия испытанных образцов колебалась в пределах 200-279 мкм.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что усилие отрыва грибка от покрытия, находящегося в исходном состоянии, достаточно высокое и колеблется в пределах от 5,5 до 7,0 МПа. Разрушение при отрыве у всех испытанных образцов происходит по материалу клеевого слоя, соединяющего грибок со силикатно-эмалевым покрытием. Следовательно, адгезионная прочность покрытия превышает усилие отрыва.

Таблица 1

Номер образца	№ 1	№2	№3	№ 4	№5	№6
Толщина покрытия, мкм	271-282	214-239	200-203	252-279	205-220	242-258
Продолжительность выдержки модельной среде при 130 ⁰ С, сут	Удельное усилие отрыва (МПа) и характер разрушения					
0	6,1 (100% Кл)	5,3 (100% Кл)	5,1 (100% Кл)	7,2 (100% Кл)	5,6 (100% Кл)	5,5 (100% Кл)
20	5,5 (100% Кл)	4,9 (100% Кл)	5,1 (100% Кл)	-	-	-
40	5,7 (100% Кл)	6,1 (100% Кл)	5,2 (100% Кл)	-	-	-
70	-	-	-	5,8 (100% Кл)	5,9 (100% Кл)	6,3 (100% Кл)
100	-	-	-	5,1 (100% Кл)	5,2 (100% Кл)	5,1 (100% Кл)

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что после выдержки образцов со силикатно-эмалевым покрытием в течение 100 суток в 3%-ном водном растворе NaCl при 130⁰С и давлении 10,0 МПа величина усилия отрыва грибка от покрытия у всех испытанных образцов практически не меняется. Сохраняется и характер разрушения. Разрушение происходит по клеевому слою (см. рис. 7, 8, 9, 10, 11, 12). Это свидетельствует о достаточно высокой прочности и стабильности в минерализованной водной среде адгезионных связей, образуемых силикатно-эмалевым покрытием с металлом НКТ.

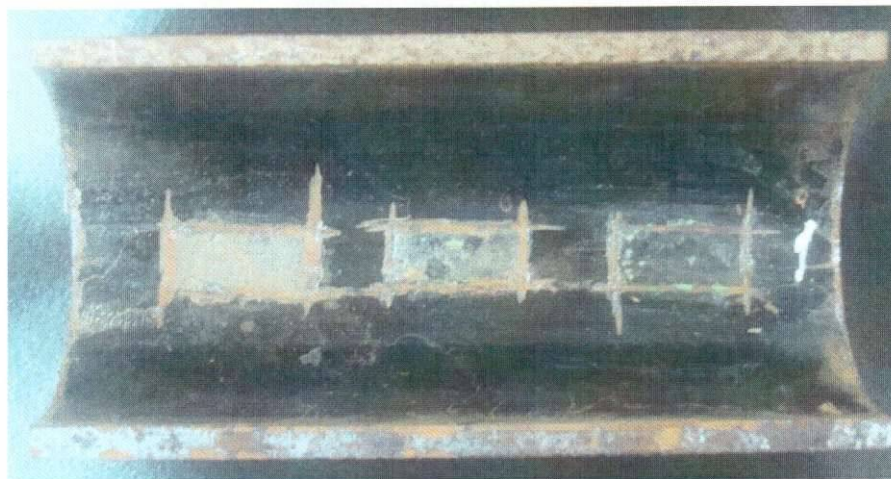


Рис. 7. Характер отрыва грибка от выделенного участка покрытия (образец N 1) в исходном состоянии и после воздействия 3%-ного водного раствора NaCl при 130⁰С в течение 20 и 40 суток

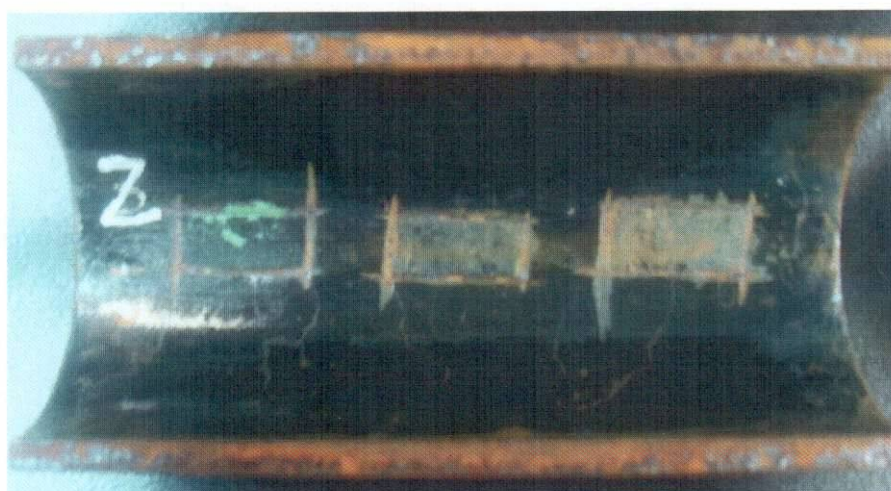


Рис. 8. Характер отрыва грибка от выделенного участка покрытия (образец N 2) в исходном состоянии и после воздействия 3%-ного водного раствора NaCl при 130⁰С в течение 20 и 40 суток

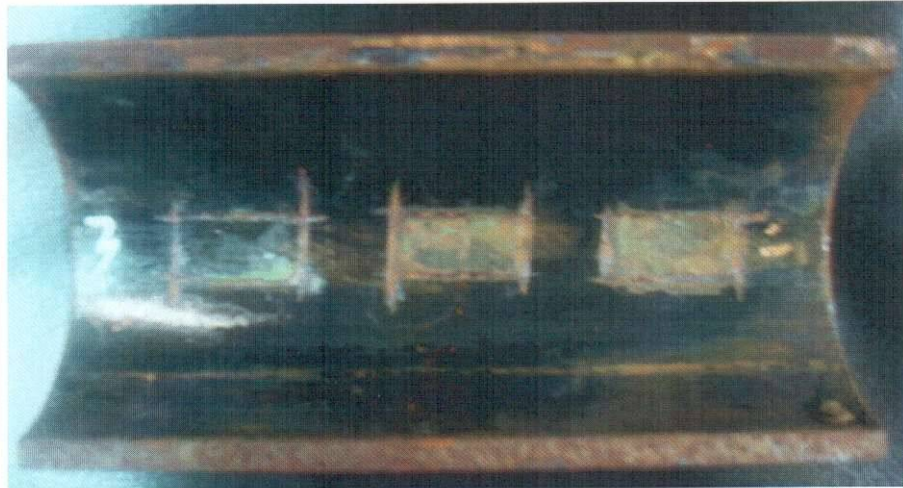


Рис. 9. Характер отрыва грибка от выделенного участка покрытия (образец N 3) в исходном состоянии и после воздействия 3%-ного водного раствора NaCl при 130⁰С в течение 20 и 40 суток



Рис. 10. Характер отрыва грибка от выделенного участка покрытия (образец N 4) в исходном состоянии и после воздействия 3%-ного водного раствора NaCl при 130⁰С в течение 70 и 100 суток

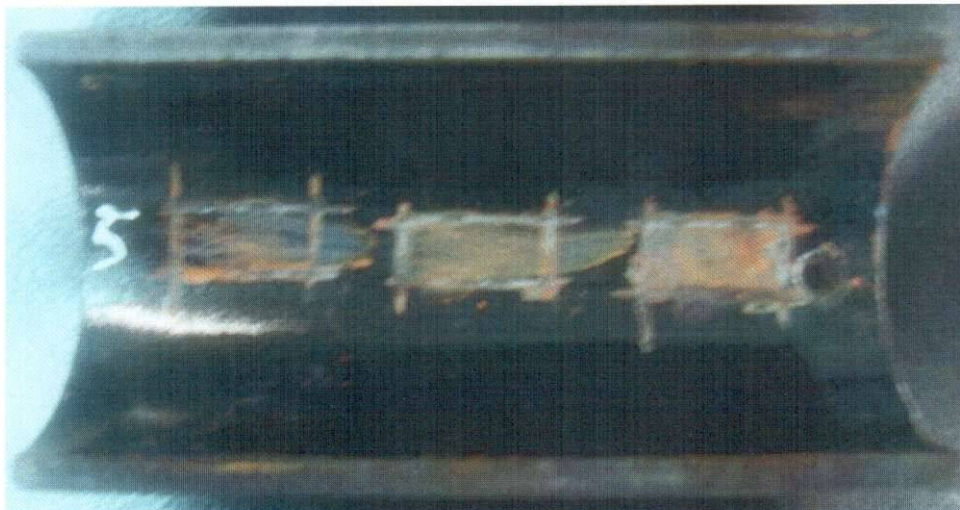


Рис. 11. Характер отрыва грибка от выделенного участка покрытия (образец N 5) в исходном состоянии и после воздействия 3%-ного водного раствора NaCl при 130⁰С в течение 70 и 100 суток



Рис. 12. Характер отрыва грибка от выделенного участка покрытия (образец N 6) в исходном состоянии и после воздействия 3%-ного водного раствора NaCl при 130⁰С в течение 70 и 100 суток

В табл. 2 приведены результаты исследования адгезионной прочности внутреннего силикатно-эмалевого покрытия НКТ после электрохимического наводороживания на различных базах времени. Толщина покрытия испытанных образцов колебалась в пределах 308-528 мкм.

Таблица 2

Номер образца	№ 31	№ 32 8)	№ 33	№ 34
Толщина покрытия, мкм	456-469	457-491	308-389	460-528
Продолжительность электрохимического наводороживания, сут	Удельное усилие отрыва (МПа) и характер разрушения			
30	5,6 (100%Кл)	5,3 (100% Кл)	-	-
50	-	-	4,8 (10%Кл 90% Пк)	4,3 (50%Кл% 50%Пк)

Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что после электрохимического наводороживания образцов со силикатно-эмалевым покрытием на базе времени 50 сут. величина усилия отрыва грибка от покрытия соответствует исходной у всех испытанных образцов. Сохраняется и исходный характер разрушения. Разрушение происходит по клеевому слою (см. рис. 13, 14, 15, 16). Это свидетельствует о достаточно высокой прочности и стабильности в условиях электрохимического наводороживания адгезионных связей, образуемых силикатно-эмалевым покрытием с металлом НКТ.



Рис. 13. Характер отрыва грибка от выделенного участка покрытия (образец N 31) в исходном состоянии и после электрохимического наводороживания в течение 30 суток



Рис. 14. Характер отрыва грибка от выделенного участка покрытия (образец N 32) в исходном состоянии и после электрохимического наводороживания в течение 30 суток



Рис. 15. Характер отрыва грибка от выделенного участка покрытия (образец N 33) в исходном состоянии и после электрохимического наводороживания в течение 50 суток



Рис. 16. Характер отрыва грибка от выделенного участка покрытия (образец N 34) в исходном состоянии и после электрохимического наводороживания в течение 50 суток

2. Исследование диэлектрической сплошности силикатно-эмалевого покрытия в исходном состоянии, после воздействия контактной нагрузки и после длительного контакта с минерализованной водной средой при повышенной температуре с последующим воздействием контактной нагрузки

2.1. Методика исследования.

Контроль диэлектрической сплошности внутреннего силикатно-эмалевого покрытия НКТ в исходном состоянии проводили на патрубках, вырезанных из НКТ с внутренним силикатно-эмалевым покрытием. Образцы были изготовлены ЗАО ТД «Капстрой».

Диэлектрическую сплошность покрытия контролировали электроискровым дефектоскопом постоянного тока с погрешностью измерения $\pm 5\%$ при величине электрического тока 4 кВ/мм. Контролю диэлектрической сплошности подлежала вся внутренняя поверхность

патрубка за исключением концевых участков, отстоящих на ширине 10 мм от торцов патрубка. Подтверждением диэлектрической сплошности покрытия являлось отсутствие пробоя при перемещении щетки дефектоскопа по поверхности покрытия.

При свинчивании НКТ с муфтой возникают значительные контактные нагрузки в местах контакта клиновых захватов ключа с телом НКТ, что может вызвать растрескивание покрытия, т.е. нарушение его диэлектрической сплошности.

Контроль влияния контактной нагрузки НКТ на диэлектрическую сплошность внутреннего покрытия НКТ осуществляли на патрубок, отрезанном от НКТ с покрытием.

Перед контактным нагружением образца осуществляли контроль диэлектрической сплошности его внутреннего покрытия в исходном состоянии электроискровым дефектоскопом. Контроль выполняли по всей поверхности покрытия за исключением концевых участков шириной 10 мм от торцов образца. При отсутствии диэлектрической сплошности образец браковался.

Образец, прошедший контроль на диэлектрическую сплошность, подвергали контактному нагружению в исходном состоянии при температуре плюс 20 °С и минус 40 °С и после воздействия 3%-ного водного раствора NaCl при температуре плюс 130°С и давлении 10,0 МПа на базе времени 100 сут.

Воздействие на образец 3%-ного водного раствора NaCl, повышенной температуры и давления проводили в автоклаве (рис.3).

В рабочую камеру автоклава устанавливали образцы, после чего камеру заполняли 3%-ным водным раствором NaCl и создавали в автоклаве требуемые значения давления и температуры. После выдержки образцов в автоклаве на базе времени 100 суток сбрасывали давление в рабочей камере автоклава, охлаждали модельную среду до комнатной температуры,

извлекали образцы из автоклава, протирали их фильтровальной бумагой и проводили их контактное нагружение.

На рис. 13 приведена расчетная схема контактного нагружения патрубка с внутренним силикатно-эмалевым покрытием.

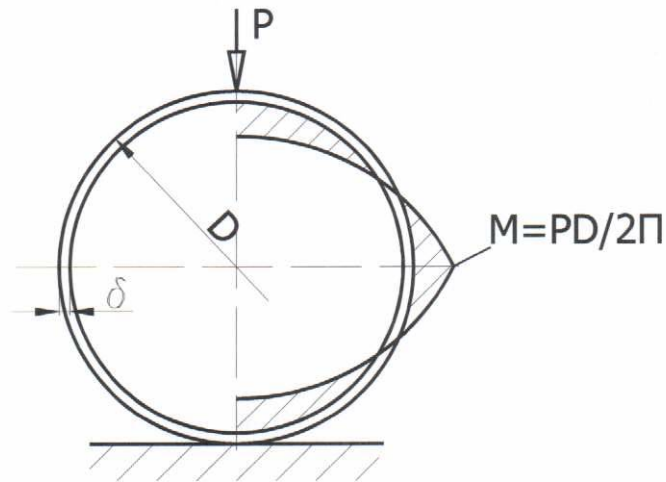


Рис. 13. Расчетная схема контактного нагружения патрубка с внутренним силикатно-эмалевым покрытием

При данной схеме контактного нагружения величина максимального напряжения, возникающего в металле образца, связана с величиной контактной нагрузки P следующим выражением

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} = \frac{PD}{2\pi} \cdot \frac{6}{l\delta^2} = \frac{3PD}{\pi \cdot l\delta^2}.$$

Так как максимальная величина напряжений, возникающих в металле НКТ при контактном нагружении, не должна превышать, согласно действующей нормативной документации, $0,9\sigma_t$, то значение усилия сжатия образца рассчитывали с помощью уравнения

$$P_{max} = \frac{0,9\sigma_t \pi \delta^2 l}{3D},$$

где σ_t - предел текучести металла образца; δ - толщина стенки образца; l - длина образца; D - наружный диаметр образца.

При контактном нагружении образца в виде патрубка, вырезанного из НКТ группы прочности К ($\sigma_t = 600 \text{ МПа}$) с размерами $l=50 \text{ мм}$, $D=73 \text{ мм}$, $\delta=5,5 \text{ мм}$ значение $P_{\text{max}}=1191 \text{ Н}$.

Контактную нагрузку на образец создавали на машине для испытаний на растяжения с помощью приспособления, приведенного на рис. 14.

Для контактного нагружения образца при отрицательной температуре машину для испытаний на растяжение оборудовали криокамерой, позволяющей охладить образец с силикатно-эмалевым покрытием перед контактным нагружением до температуры минус 40°C .

После создания требуемой контактной нагрузки образец демонтировали из приспособления и контролировали диэлектрическую сплошность внутреннего покрытия электроискровым дефектоскопом.

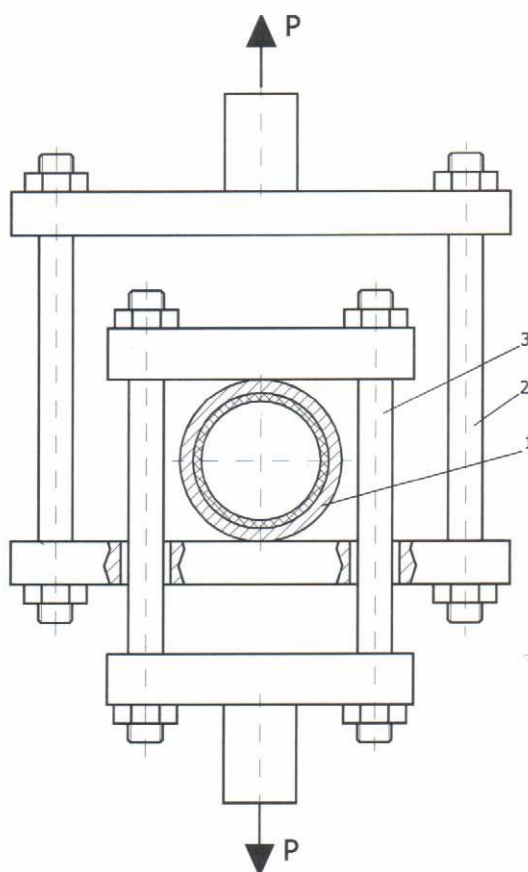


Рис. 14. Схема испытания покрытия на сопротивление растрескиванию при заданной величине усилия сжатия образца

1 - патрубок НКТ с покрытием; 2 – траверса верхняя; 3 – траверса нижняя

2.2. Результаты исследования.

Результаты исследований представлены в табл. 4.

Таблица 4

№ образца	Продолжительность выдержки в 3%-ном водном растворе NaCl, сут.	Величина контактной нагрузки, Н	Результаты контроля диэлектрической сплошности
20	0 температура плюс 20 ⁰ С	1191	Отсутствие пробоя
21	0 температура плюс 20 ⁰ С	1191	Отсутствие пробоя
23	0 температура минус 40 ⁰ С	1191	Отсутствие пробоя
24	0 температура минус 40 ⁰ С	1191	Отсутствие пробоя
25	100 температура плюс 130 ⁰ С	1191	Отсутствие пробоя
26	100 температура плюс 130 ⁰ С	1191	Отсутствие пробоя

Анализ данных, приведенных в табл. 4, показывает, что силикатно-эмалевое покрытие НКТ обладает диэлектрической сплошностью в исходном состоянии и сохраняет ее в условиях контактного нагружения как до воздействия минерализованной водной среды, так и после ее длительного воздействия при повышенной температуре при величине напряжений растяжения в металле НКТ допускаемых действующей нормативной документацией.

3. Исследование внешнего вида и переходного сопротивления силикатно-эмалевого покрытия в исходном состоянии и после длительного воздействия минерализованной водной среды при повышенной температуре

3.1. Методика исследования

Контроль внешнего вида и переходного сопротивления внутреннего покрытия НКТ в исходном состоянии и после длительного воздействия минерализованной водной среды при повышенной температуре проводили на

образцах типа сегментов, вырезанных из НКТ с внутренним силикатно-эмалевым покрытием. Образцы были изготовлены ЗАО ТД «Капстрой».

Внешний вид силикатно-эмалевого покрытия контролировали визуально.

Контроль переходного электрического сопротивления силикатно-эмалевого покрытия осуществляли с помощью приспособления, представленного на рис.15.

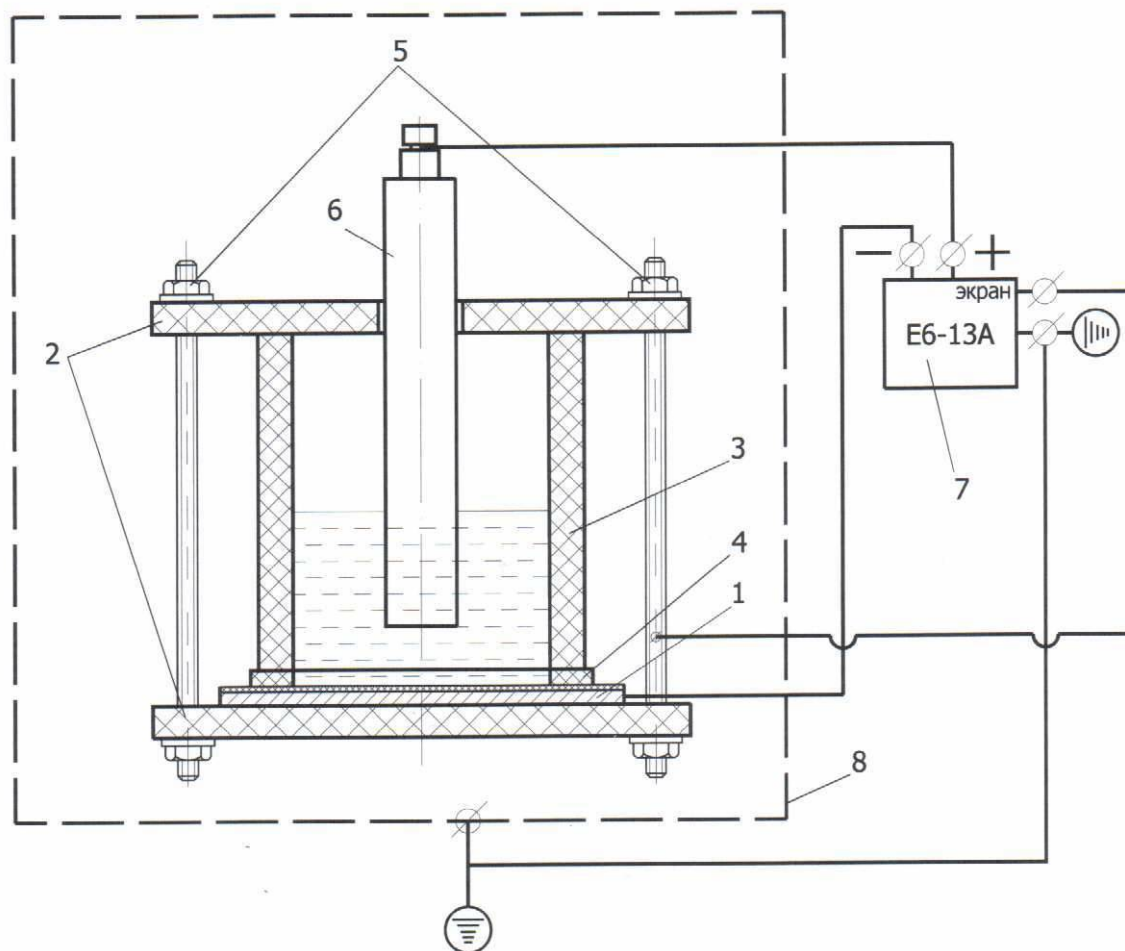


Рис. 15. Схема установки для контроля переходного электрического сопротивления покрытия

1- образец с покрытием; 2 – крышка; 3 - цилиндр из полиэтиленовой трубы; 4 – прокладка; 5 - шпилька, шайба, гайка; 6 - электрод графитовый; 7 – термоамметр; 8 - измерительная камера

Образец, прошедший контроль на диэлектрическую сплошность, устанавливали в ячейку приспособления, которую затем заполняли модельной средой. В качестве модельной среды применяли 3% -ный водный

раствор NaCl. Расстояние от зеркала раствора до поверхности покрытия было не менее 50 мм. Затем устанавливали в ячейку графитовый электрод 6. Расстояние от нижнего торца электрода до поверхности покрытия было не более 20 мм. Образец с покрытием подключали к отрицательному полюсу тераомметра, а графитовый электрод 6 к положительному полюсу (рис. 7). Устанавливали на тераомметре постоянный ток напряжением 100 В и производили измерение переходного сопротивления покрытия в соответствии с инструкцией по эксплуатации тераомметра при температуре 20 °С.

Переходное электрическое сопротивление покрытия рассчитывали по формуле

$$R_{n.c.} = R_n \cdot S,$$

где R_n -сопротивление покрытия образца; S -площадь контакта покрытия с раствором в ячейке, m^2 ; $S = \pi D^2 / 4$; D -внутренний диаметр ячейки с раствором, м.

Контролировали внешний вид и переходное электрическое сопротивление покрытия в исходном состоянии и после 100 суток выдержки в 3%-ном водном растворе NaCl при температуре 130° С и давлении 10,0 МПа.

Воздействие на образец 3%-ного водного раствора NaCl, повышенной температуры и давления проводили в автоклаве (рис.3).

В рабочую камеру автоклава устанавливали образцы, прошедшие контроль на диэлектрическую сплошность, после чего камеру заполняли 3%-ным водным раствором NaCl и создавали в автоклаве требуемые значения давления и температуры. После выдержки образцов в автоклаве на базе времени 100 суток сбрасывали давление в рабочей камере автоклава, охлаждали модельную среду до комнатной температуры, извлекали образцы из автоклава, протирали их фильтровальной бумагой и проводили контроль внешнего вида и переходного сопротивления покрытия.

3.2. Результаты исследования.

Результаты исследования приведены в табл. 3.

Таблица 3

№ образца	Толщина покрытия, мм	Продолжительность выдержки в 3%-ном водном растворе NaCl при 130 ⁰ С, сут.	Внешний Вид	Переходное электрическое сопротивление покрытия, Ом м ²
11	466 – 528	0	Отсутствие недопустимых дефектов	4,0 10 ⁶
		100	Отсутствие изменений	2,0 10 ⁶
12	351 – 462	0	Отсутствие недопустимых дефектов	6,0 10 ⁶
		100	Отсутствие изменений	4,0 10 ⁶

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что внешний вид силикатно-эмалевого покрытия в исходном состоянии отвечает предъявляемым требованиям. Недопустимые дефекты отсутствуют. После длительного воздействия минерализованной водной среды при температуре 130⁰С и давлении 10,0 МПа сохраняется исходный внешний вид покрытия.

Из данных, приведенных в табл. 3, видно, что силикатно-эмалево покрытие после длительного воздействия минерализованной водной среды при температуре 130⁰С и давлении 10,0 МПа обладает низкой проницаемостью по отношению к среде, являющейся электролитом, о чем свидетельствует его достаточно высокое переходное сопротивление.

4. Исследование удельной силы сцепления силикатно-эмалевого покрытия с твердыми отложениями смолопарафинов и минеральных солей, сформированными на поверхности покрытия

4.1. Методика исследования.

Для контроля сопротивления сдвигу твердых отложений АСП и минеральных солей относительно поверхности силикатно-эмалевого покрытия использовали сегменты (рис. 16), вырезанные из НКТ с покрытием, длиной 150 мм.

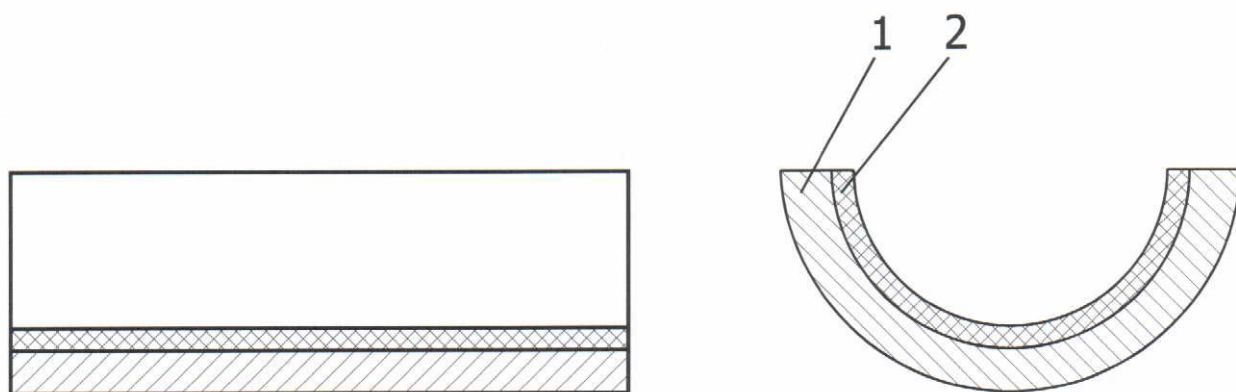


Рис.16. Образец для контроля сопротивления сдвигу твердых отложений АСП и минеральных солей относительно поверхности покрытия

1 – сегмент НКТ; 2 - покрытие

На поверхности покрытия образца формировали с помощью специальной ячейки слой смолопарафинов или минеральных солей (рис. 17).

При формировании слоя смолопарафинов ячейку, установленную на поверхности покрытия, заполняли расплавом отложений смолопарафинов, извлеченных из проточных каналов скважинного оборудования, с последующим охлаждением сформированного слоя до комнатной температуры.

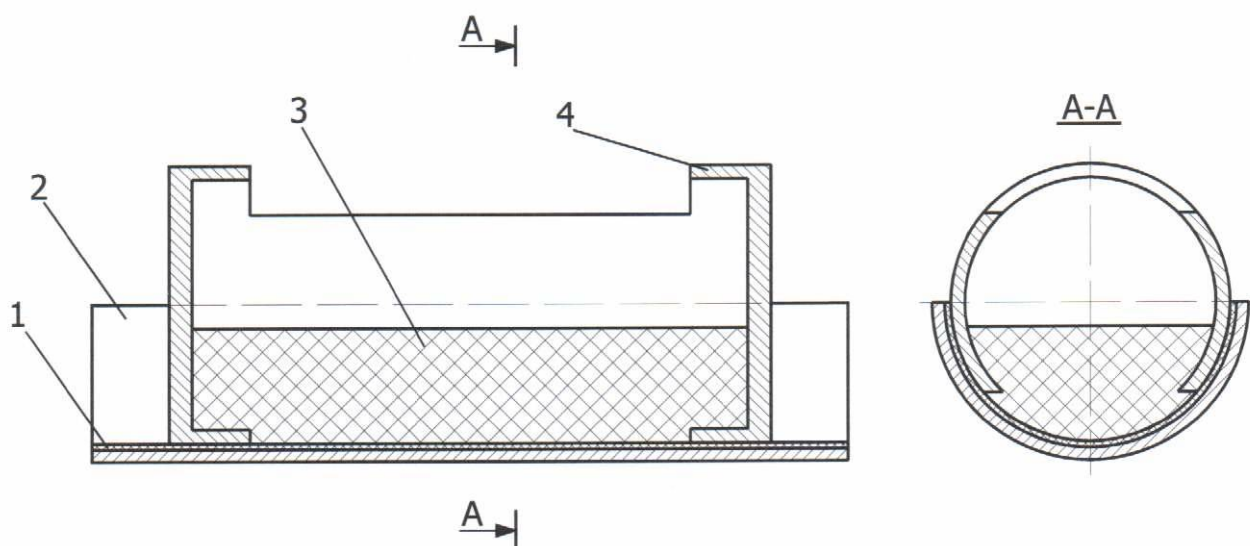


Рис.17. Схема приспособления для формирования слоя твердых отложений во внутренней полости образца с покрытием.

1 – покрытие; 2 – образец, вырезанный из НКТ; 3-слой отложений; 4 – ячейка

При формировании солевого слоя на поверхности покрытия ячейку заполняли пастой, полученной смачиванием водой порошка дисульфида магния ($MgSO_4$), с последующей выдержкой сформированного слоя при температуре плюс $60-80^{\circ}C$ в сушильном шкафу до полного удаления влаги и образования внутри формочки монолитного солевого слоя.

Образец с сформированным на поверхности покрытия слоем смолопарафинов или минеральной соли устанавливали в приспособление (рис. 18) для механических испытаний на сдвиг слоя отложений относительно поверхности покрытия.

Сегмент НКТ закрепляли на опорной плите приспособления. К ячейке подсоединяли динамометр растяжения и определяли усилие сдвига Q сформированного слоя отложений относительно поверхности покрытия при скорости перемещения ячейки относительно опорной плиты приспособления 10 мм/мин. Для исключения силы трения ячейки относительно поверхности покрытия из значения усилия сдвига вычитали усилие, необходимое для

сдвига ячейки относительно поверхности испытуемого покрытия при отсутствии слоя отложений.

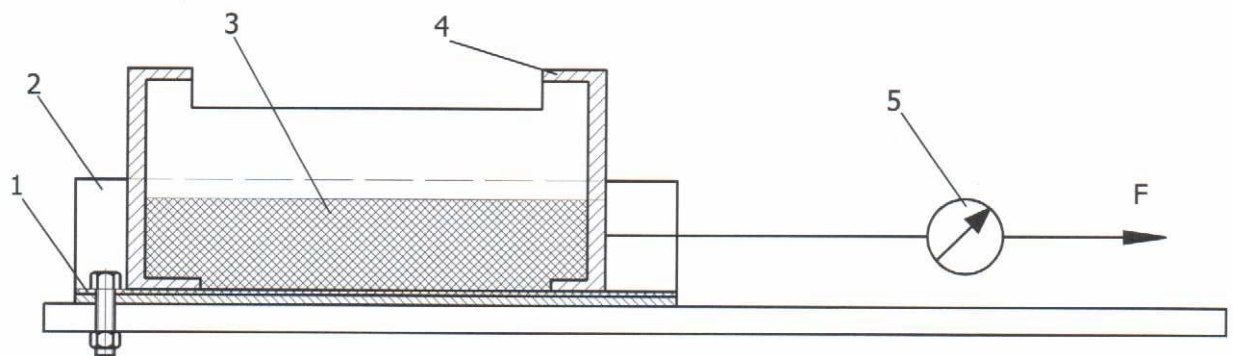


Рис.18. Схема приспособления для испытаний на сдвиг отложений твердых веществ на поверхности покрытия
1–покрытие НКТ; 2 – сегмент НКТ; 3–слой отложений; 4–ячейка; 5 – динамометр

Затем рассчитывали удельное усилие сдвига по формуле:

$$q_{сд} = \frac{Q_{сд}}{F},$$

где F-площадь контакта слоя отложений с поверхностью покрытия.

4.2. Результаты исследования

В таблице 4 приведены результаты исследования удельного усилия сдвига сформированных слоев твердых отложений смолопарафинов и минеральной соли относительно поверхности силикатно-эмалевого покрытия. Для сравнения в той же таблице приведены значения удельного усилия сдвига аналогичных слоев отложений относительно широко используемого в промышленности для внутренней изоляции НКТ эпоксидного покрытия.

Анализ данных, приведенных в табл. 4, показывает, что удельное усилие сдвига отложений смолопарафинов относительно поверхности силикатно-эмалевого покрытия в 2 раза ниже по сравнению с удельным

Таблица 4

Покрытие	Тип отложений	Удельное усилие сдвига, кПа
Силикатно-эмалевое	Смолопарафины	3,5
Эпоксидное	Смолопарафины	7,1
Силикатно-эмалевое	Минеральная соль	30,6*
Эпоксидное	Минеральная соль	30,6*

Примечание * Срез по слою минеральной соли.

усилием сдвига тех же отложений относительно эпоксидного покрытия. Это свидетельствует об эффективности использования НКТ с внутренним силикатно-эмалевым покрытием в скважинах, характеризующихся значительным отложением АСП на внутренней поверхности колонны НКТ.

Низкая прочность сцепления смолопарафинов с поверхностью силикатно-эмалевого покрытия обеспечит их срыв с поверхности НКТ потоком транспортируемой продукции скважины.

Из данных, приведенных в табл. 4, видно, что удельное усилие сдвига отложения минеральной соли относительно поверхности как силикатно-эмалевого, так и эпоксидного покрытия очень высокое. При этом происходит срез слоя отложения, а не сдвиг его относительно поверхности покрытия. Это свидетельствует о том, что прочность сцепления отложения минеральной соли с поверхностью покрытия значительно выше и применение как силикатно-эмалевого, так и эпоксидного покрытия не предотвратит образование солевых отложений на их поверхности НКТ.

5. Исследование износостойкости силикатно-эмалевого покрытия в паре трения со штанговой муфтой

5.1. Методика исследования.

Исследование износостойкости силикатно-эмалевого покрытия стали в паре трения со штанговой муфтой проводили на специальной установке, кинематическая схема которой приведена на рис.19.

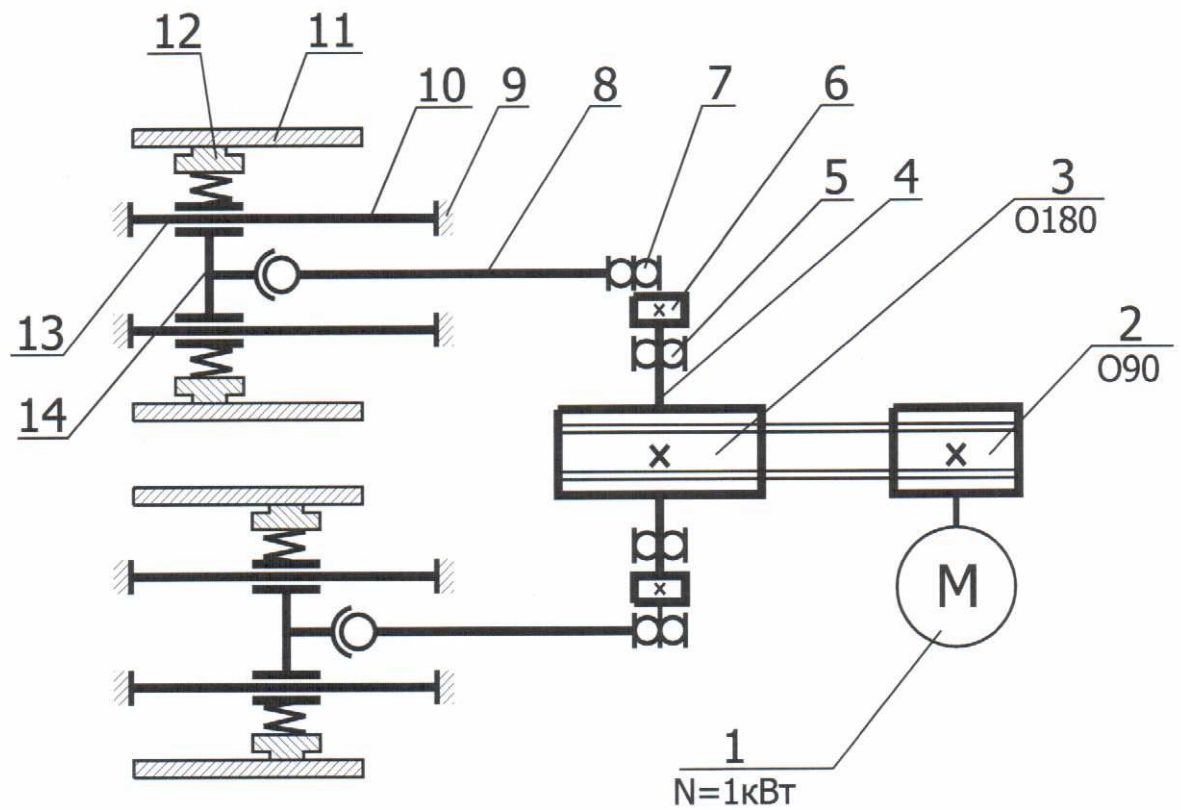


Рис.19. Кинематическая схема лабораторной установки для контроля сопротивления внутреннего покрытия НКТ механическому изнашиванию

1 – электродвигатель постоянного тока; 2,3 - шкив; 4 – вал; 5 – опора; 6 - эксцентрик; 7 - подшипник; 8 - шатун; 9 – опора направляющей; 10 - направляющая; 11 – образец с покрытием; 12 – контртело; 13 - пружина; 14 – ползун.

Установка имеет два ползуна 14, в которых устанавливаются подвижные стальные образцы 12, имитирующие штанговую муфту. Ползуны получают возвратно-поступательное движение от эксцентриков 6, установленных на валу 4. Привод осуществляется от электродвигателя постоянного тока 1, позволяющего осуществлять бесступенчатое регулирование двойных ходов ползуна от 50 до 500.

Для испытания силикатно-эмалевого покрытия на изнашивание использовались образцы, вырезанные из НКТ с указанным покрытием размером 80x20x5 (рис.20).

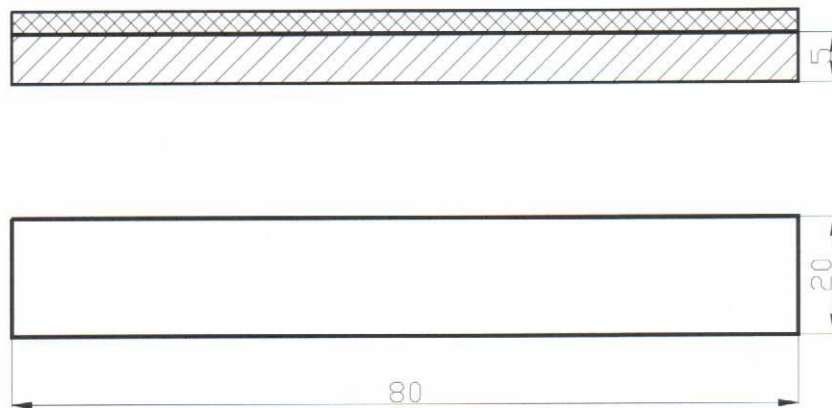


Рис.20. Образец для испытаний покрытий на сопротивление механическому изнашиванию

Контртело 12, имитирующее штанговую муфту, было изготовлено из стали 40, используемой для муфт серийного производства.

Длина хода образца муфты, выполняющего функции контртела в паре трения с покрытием, была равна 50 мм. Скорость перемещения контртела составляла 1 м/с, удельное контактное давление равнялось 4,5 МПа.

На рис.21 показан узел трения установки. Специальное крепление контртела в головке ползуна установки (рис. 21) обеспечивало его самоустановку для лучшей прирабатываемости поверхностей трения.

Для измерения величины износа применялся индикатор с ценой деления 0,001мм, установленный на стойке микроскопа МИС-11 (рис.22). В начальный момент период процесса изнашивания происходит приработка поверхностей, поэтому при проведении испытаний на изнашивание необходимо четко определить продолжительность периодов приработки и нормального износа. Проводилась предварительные испытания покрытия на износ при заданных режимах трения для притирки трущихся поверхностей, а затем определяли по счетчику установки минимальное число двойных ходов контртела, при котором величина износа покрытия не менее 0,002 мм. Принимали это число двойных ходов контртела за базу продолжительности испытаний покрытия на износ.

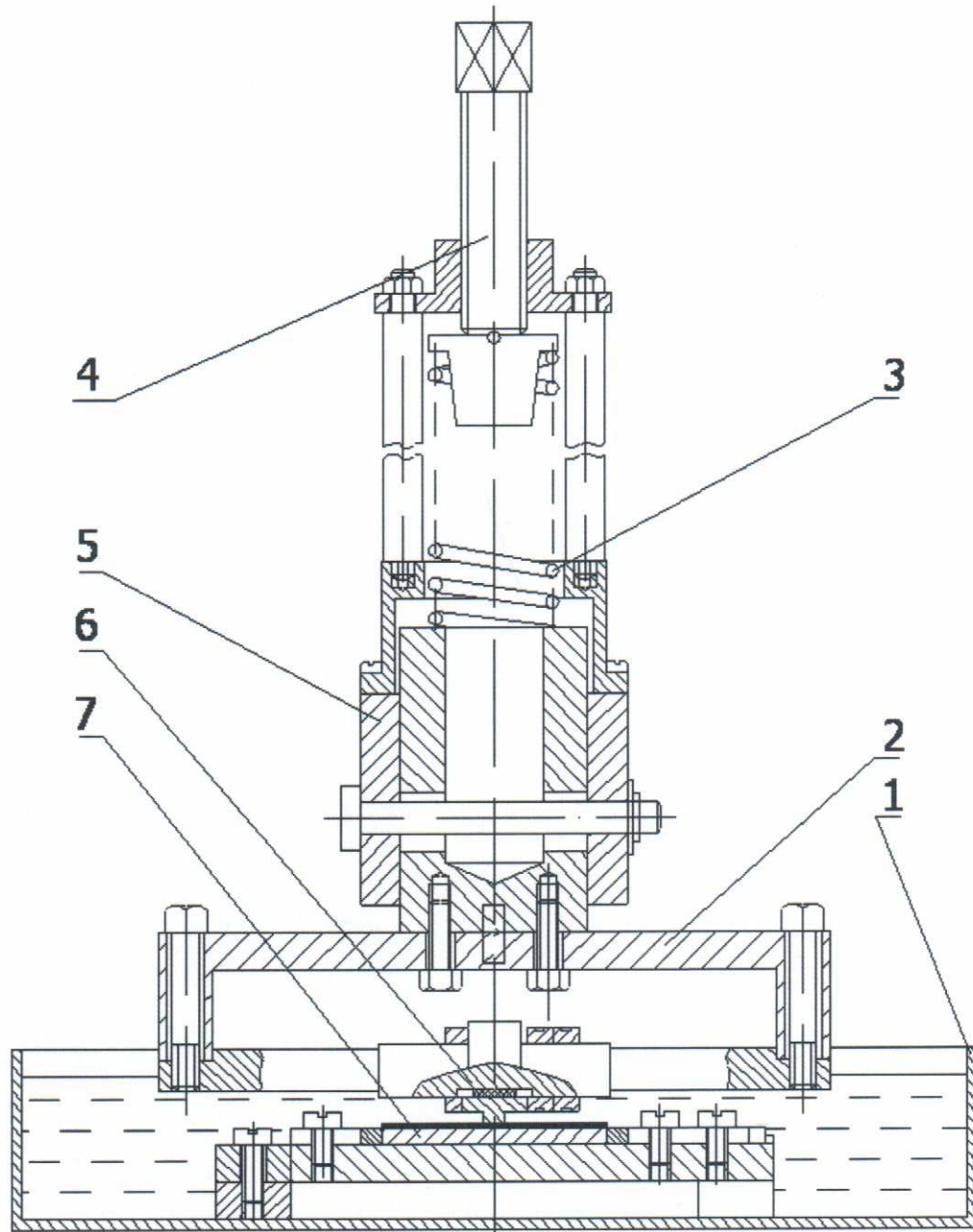


Рис.21. Узел трения лабораторной установки для испытаний на изнашивание

1 – ванночка; 2 - опора; 3 – регулировочная пружина; 4 – нажимной винт; 5 – пластина для крепления контртела; 6 – контртело; 7 – образец с покрытием

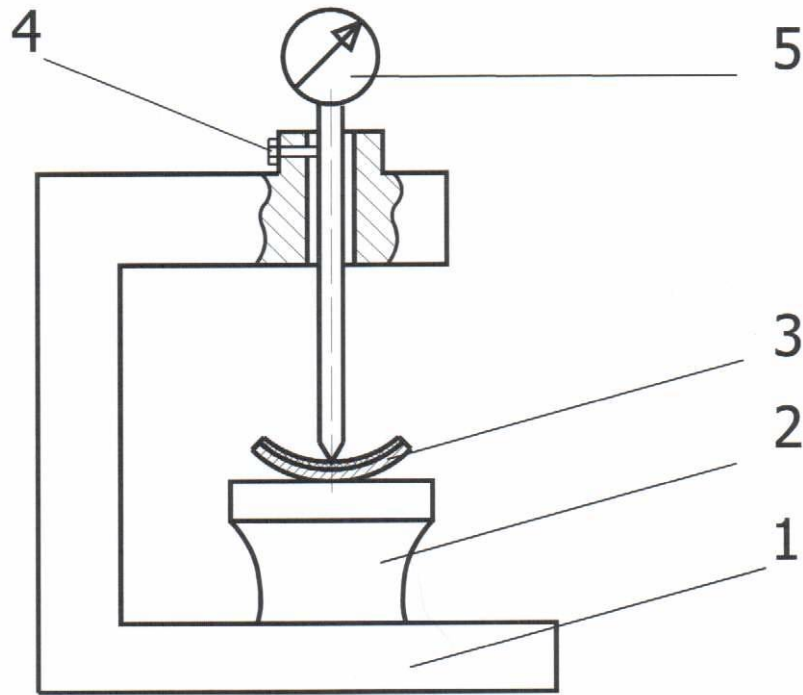


Рис.22. Схема стойки с опорной плитой для измерения толщины покрытия.
1 – стойка; 2 – плита опорная; 3 – образец; 4 – винт крепежный; 5 – индикатор

Измерение толщины покрытия после проведения притирки трущихся поверхностей и после проведения испытания на износ на заданной базе числа двойных ходов контртела производили в трех сечениях (рис. 23) по длине изношенного участка. За результат принимали среднее арифметическое значение толщины.

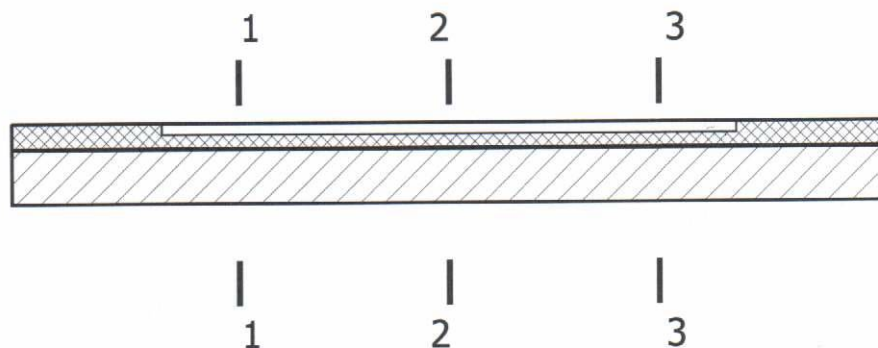


Рис. 23. Схема измерения толщины покрытия

5.2. Результаты исследования.

Результаты исследования представлены в табл. 5

Таблица 5

Путь трения муфты по покрытию, м	Уменьшение толщины покрытия вследствие износа, мкм
1000	11
2000	22
3000	32
4000	43
5000	54
6000	64
7000	75
8000	86

На рис. 24 показан характер износа силикатно-эмалевого покрытия в паре трения с образцом штанговой муфты.

Значительному износу подвергается и образец штанговой муфты.



Рис. 24. Характер износа силикатно-эмалевого покрытия в паре трения со штанговой муфтой

На основании данных, приведенных в табл. 5, была рассчитана интенсивность изнашивания покрытия, т.е. величина износа покрытия, отнесенная к 1000 м. пути трения образца муфты. Результаты расчета показали, что среднее значение интенсивности изнашивания силикатно-эмалевого покрытия составляет 11 мкм/1000 м. При длине хода насосных штанг 1,5 м и при числе двойных ходов в мин. равном 10 путь трения муфты по покрытию в минуту составит 30 м, а за год он будет равным $30 \times 60 \times 24 \times 365 = 15768000$ м. При указанном пути трения уменьшение толщины покрытия вследствие износа при интенсивности изнашивания 11 мкм/1000м

составит за год $\Delta\delta^{нк}=173448$ мкм, что значительно превышает фактическую исходную толщину внутреннего силикатно-эмалевого покрытия НКТ.

6. Заключение

Результаты исследования физико-химических и механических свойств внутреннего силикатно-эмалевого покрытия НКТ в исходном состоянии и при различных видах внешнего воздействия на НКТ на разных стадиях их жизненного цикла НКТ, позволяют достаточно обоснованно сделать следующие выводы:

1. Внутреннее силикатно-эмалевое покрытие НКТ обладает диэлектрической сплошностью, устойчивой адгезией к металлу НКТ и достаточно высоким переходным сопротивлением в продукции добывающих и нагнетательных скважин в исследованном температурном диапазоне от 20⁰С до 130⁰С, что свидетельствует о его эффективном противокоррозионном действии при соблюдении требований ГОСТ 633, оговаривающих допустимые напряжения в металле НКТ и допустимые внешние воздействия на НКТ на стадиях их хранения, транспортирования, монтажа и эксплуатации.

2. Внутреннее силикатно-эмалевое покрытие НКТ обладает более низкой прочностью сцепления с твердыми отложениями смолопарафинов, образующихся на внутренней поверхности НКТ, по сравнению внутренним эпоксидным покрытием НКТ, что обуславливает эффективный срыв этих отложений силой трения потока транспортируемой продукции скважины.

3. Внутреннее силикатно-эмалевое покрытие НКТ, как и внутреннее эпоксидное покрытие НКТ, не предотвращает образования значительных солевых отложений на внутренней поверхности НКТ, что объясняется полярностью указанных видов покрытий, обуславливающей их активное молекулярное взаимодействие с полярной минерализованной водной средой, вследствие чего образуются достаточно прочные адгезионные связи солевых отложений с поверхностью покрытия.

4. Силикатно-эмалевое покрытие НКТ обладает низкой износостойкостью в паре трения со штанговой муфтой и вызывает интенсивный износ самой штанговой муфты, в связи с чем не рекомендуется применять НКТ с внутренним силикатно-эмалевым покрытием в скважинах, эксплуатируемых установками скважинных штанговых насосов.

7. Литература

1. Протасов В.Н. Теория и практика применения полимерных покрытий в оборудовании и сооружениях нефтегазовой отрасли. М.: Недра, 2007 г.