

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(СПбГУ)

Кафедра грунтоведения и инженерной геологии

***КОРОТЫГИНА Анастасия Ярославовна***

**Выпускная квалификационная работа бакалавра**

***Влияние техногенного изменения свойств дисперсных грунтов на  
параметры катодной защиты подземных металлических сооружений.***

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа ВМ.5798.2019 «Гидрогеология и инженерная  
геология»

Научный руководитель:

зав. каф. грунтоведения

и инженерной геологии ин-та наук о Земле,

к.г.-м. н., доцент

Бурлуцкий Станислав Борисович

Рецензент: главный

специалист по ПКЗ, ЗАО

«Трубопроводные системы

и технологии», к.г.-м.н.

Яблучанский Анатолий Игнатьевич

Санкт-Петербург

2022

## Содержание

Содержание .....	2
Введение .....	3
Глава 1. Основы защиты от коррозии и подземной коррозии .....	4
Глава 2. Коллоидно-химические свойства дисперсных грунтах .....	13
2.1. Двойной электрический слой .....	14
2.2. Электрокинетические явления в дисперсных грунтах.....	19
2.3.Электроосмос в дисперсных грунтах .....	21
2.4.Факторы, влияющие на электроосмос в грунтах.....	24
2.5.Электрофорез в дисперсных грунтах.....	29
2.6.Электрокоагуляция и преобразование структуры грунтов .....	30
2.7. Опыт на образце кембрийских глин. ....	32
Глава 3. Основные результаты исследования.....	37
3.1. Основные результаты исследования на четвертичных песках. ....	37
3.2. Основные расчёты трубопровода «Южный поток».....	42
Заключение.....	56
Список литературы.....	57
<i>Приложение 1. Инженерно-геологический разрез на участке работ. ....</i>	<i>59</i>
<i>Приложение 2. Инженерно-геологический разрез на участке работ. ....</i>	<i>60</i>

## Введение

Катодная защита применяется для защиты от коррозии повсеместно, от обычного водопровода до нефте- и газопроводов, длина которых в России составляет сотни тысяч километров. Соответственно объем грунтов вблизи зоны катодной защиты огромный.

Под действием катодной защиты происходит изменение физико-механических свойств грунтов: увеличивается влажность, понижаются прочностные и деформационные свойства грунтов, которые не учитываются при строительстве и эксплуатации объектов, которым применяется катодная защита, но самое главное, не учитываются изменения удельное сопротивления грунтов, которые, исходя из исследований, изменяются уже спустя полгода. Данные изменения удельного сопротивления, необходимо учитывать, так как они непосредственно участвуют в расчётах напряжений установки катодной защиты (УКЗ).

Таким образом, изучение зоны формирования техногенно-измененных дисперсных грунтов различных генетических типов под влиянием токов катодной защиты необходимо для проектирования, строительства и предотвращения разрушений различных объектов и других зданий, сооружений, которые находятся в зоне влияния катодной защиты.

Целью работы является изучение влияния техногенного изменения свойств дисперсных грунтов на параметры катодной защиты подземных металлических сооружений.

Для выполнения работы были определены следующие задачи:

- 1) изучение литературы и ГОСТов на тему электрохимической коррозии и электрокинетических явлений в грунтах
- 2) Проведение полевых испытаний в четвертичных песках и дальнейший анализ изменений физико-механических свойств исследуемых грунтов.
- 3) Выявление электрических параметров трубопровода «Южный поток» в глинистых грунтах, а также определение влияния изменения физико-механических свойств грунта на удельное сопротивление грунта, и дальнейшее изменение параметров УКЗ.

## Глава 1. Основы защиты от коррозии и подземной коррозии

Коррозия металлов – это самопроизвольное разрушение металлических материалов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с окружающей средой. Коррозионный процесс протекает на границе двух фаз металл – окружающая среда. По механизму протекания, коррозионные процессы разделяют два основных типа: химический и электрохимический. (Жук, 1976)

По характеру коррозионных разрушений различают *сплошную* и *местную* коррозию. *Сплошная коррозия* охватывает всю поверхность сооружения или конструкции. *Местная коррозия* поражает отдельные участки металлических сооружений и конструкций в виде пятен ржавчины, каверн, точечных и других повреждений различной глубины вплоть до сквозных.

Различают два механизма коррозии металлов: химический и электрохимический.

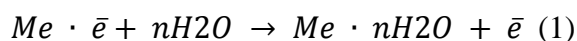
*Химическая коррозия* является результатом непосредственной реакции металлов с неэлектролитами, при которой окисление металла и восстановление окислительной компоненты коррозионной среды происходит в одном акте. В свою очередь химическую коррозию по условиям протекания разделяют на газовую коррозию (окисление металла в сухих газах при высокой температуре) и коррозию в жидких агрессивных средах, не обладающих электропроводностью (нефть, нефтепродукты и другие органические соединения).

*Электрохимическая коррозия* подчиняется законам электрохимической кинетики и представляет собой окисление металла в электропроводных средах, сопровождающееся образованием и протеканием электрического тока. При этом принято говорить о дифференцировании корродирующей поверхности на катодные и анодные зоны, несмотря на разрушение корродирующего металла происходит в основном на анодных участках металлических сооружений. (Бурлуцкий, 2020) По условиям протекания электрохимической коррозии различают ее основные виды: подземную (в грунтах, в т.ч. в морских грунтах); с блуждающими токами; микробиологическую (под воздействием микроорганизмов); контактную (при контактах металлов, имеющих различные стационарные потенциалы в данной коррозионной среде); атмосферную (в воздухе или во влажных газах); внутреннюю (трубопроводов и емкостей).

## 1.1. Основы электрохимической коррозии

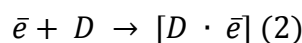
Электрохимическая теория коррозии основана на положении, что при всех условиях работы металлических сооружений, соприкасающихся с электролитом, на поверхности металла вследствие ряда причин возникает большое количество мелких коррозионных гальванических элементов, и соответственно различие потенциалов на разных участках металла. (Притула, 2003). Различие потенциалов на поверхности металла обусловлены различными факторами: внутренними (неоднородности металлической фазы, поверхности металла, атомная неоднородность, неоднородность защитных плёнок и неоднородность внутренних напряжений в металле) и внешними (неоднородность жидкой фазы, неоднородность физических условий). Наличие разных потенциалов на поверхности металла приводит к дифференциации на анодные (с более отрицательным электродным потенциалом) и катодные (с более положительным электродным потенциалом) участки (Жук, 1976).

Таким образом, в результате движения тока при электрохимической коррозии протекают три процесса: анодный и катодный. Анодный процесс – образование гидратированных ионов металла в электролите и некомпенсированных электронов на анодных участках реакции.

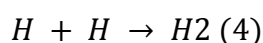
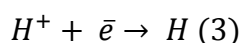


Второй процесс – это процесс перетекания электронов по металлу от анодных участков к катодным и соответствующего перемещения катионов и анионов в растворе.

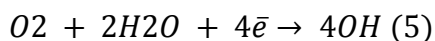
И третий процесс – катодный, сводящийся к ассимиляции избыточных электронов каким либо деполяризатором раствора (D), то есть атомом или ионом, способным поглощать электрон:



Катодный и анодный процессы протекают одновременно и параллельно, что обеспечивает возможность непрерывного протекания процесса коррозии (Притула, 2003). Одним из важных процессов катодной деполяризации является катодная реакция восстановления иона водорода в газообразный водород, носящая название водородной деполяризации и имеющая следующую схему:



И катодная реакция восстановления кислорода с превращением его в ион гидроксила, носящая название кислородной деполяризации:



Главной особенностью процесса коррозии является то, что разрушения при электрохимической коррозии происходят только на анодах, а на катодах происходит процесс деполяризации и разрушение металла нет. Отсюда следует что, основные условия возникновения коррозии, характеризуются необходимостью наличия следующих факторов:

- 1) Диссоциированных ионов в электролите.
- 2) Металлическое соединение отдельных участков металла между собой, например телом самого объекта или сооружения.
- 3) Наличие двух разнородных металлов или участков одного и того же металла с различными значениями потенциала
- 4) Контакт обоих металлов или обоих участков металла с общим электролитом.

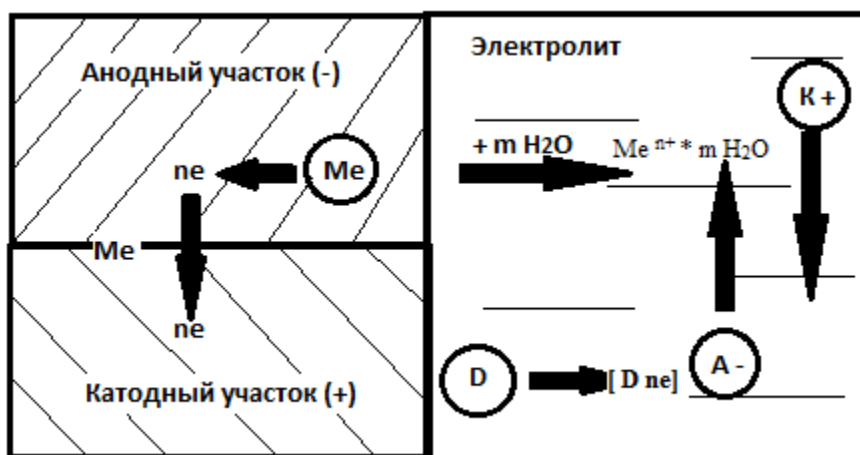


Рис.1. Электрохимический коррозионный процесс.

## 1.2. Основы подземной коррозии

Различные металлические сооружения от трубопровода до канализационной сети, от обсадных труб до кабелей связи и многие другие заглублены под землю, и непосредственно контактируют с грунтом, при этом подвергаются коррозионному разрушению. Как правило, она имеет электрохимический механизм. Грунт содержит химические элементы и воду, что делает его коррозионно-активными электролитами по

отношению к эксплуатируемым в них металлическим конструкциям, что приводит к электрохимической коррозии конструкций.

Скорость подземной коррозии зависит от таких факторов: типа грунта, его гранулометрического состава, влажности грунтов, состава и концентрации веществ, растворенных в грунтовых водах, рН грунтового электролита, воздухопроницаемости, температуры, удельного электрического сопротивления грунтов, а также чередования типов грунтов на контакте с металлическим сооружением. (Бурлуцкий, 2020).

Наибольшей коррозионной активностью обладают глинистые, пылеватые и торфянистые грунты. Наиболее коррозионно-активными из техногенных грунтов, являются насыпные грунты, поскольку они характеризуются, высокой неоднородностью состава, наличием включений различных веществ (шлаков, золы, строительного мусора), повышенным содержанием органических веществ.

Также на коррозионные процессы влияет влажность грунтов. До 15 % коррозия увеличивается и достигает своего максимума, далее уже при влажности 30-40 % коррозия заметно тормозится. Это обусловлено тем, что при увеличении влажности ухудшается поступление кислорода к поверхности металла.

Немаловажную роль в данном процессе играет агрессивность почвенной коррозионной среды, которая определяется составом и концентрацией веществ, растворенных в грунтовых водах, минерализация, которой может колебаться в широких пределах от 10 мг/л до 400 г/л.

Различные химические соединения и ионы влияют на коррозию металлов по-разному, например, При большом содержании хлоридов в почвенном электролите образование на поверхности металла защитных пленок затрудняется или они не образуются вообще, сумма  $Cl^-$  и  $SO_4^{2-}$  более 300 мг/л указывает на высокую коррозионную активность среды, а содержание  $Cl^-$  больше 0,1 % или серы более 0,3 % обуславливает высокую коррозионную активность по отношению к стали, также присутствие в грунтах органических и азотистых веществ неблагоприятно для свинца, а для алюминия — растворов хлоридов.

В значительной мере характеризует степень коррозионной активности грунтов величина рН. Наименьшая агрессивность грунтов отличается у каждого металла, например, : железо – 10-14; алюминий – 6-7; свинец – 7-8; цинк – 11-11,5.

Не менее важная характеристика почвенно-грунтовой коррозионной среды является воздухопроницаемость грунта, на которую влияют размеры частиц и влажность. В результате неравномерного проникновения воздуха к различным участкам подземного металлического сооружения (поступление кислорода к поверхности металлов происходит с атмосферным воздухом) возникают гальванические пары. Катодами таких гальванических пар всегда будут хорошо аэрируемые участки, анодами — мало аэрируемые. (Бурлуцкий, 2020)

Также удельное электрическое сопротивление грунтов влияет на опасность коррозии, и имеет прямую зависимость, чем меньше удельное сопротивление, тем агрессивней грунт, из это следует, что при оценке коррозионной активности грунтов следует учитывать удельное электрическое сопротивление  $\rho$ .

Удельное электрическое сопротивление зависит от:

- типа и влажности грунта;
- минерализации поровой влаги;
- состава растворенных солей,
- воздухопроницаемости и др.

Большим удельным сопротивлением обладают сухие и маловлажные грунты, при увеличении влажности и содержания раствора солей удельное сопротивление уменьшается. Также при замерзании влаги в грунте сопротивление грунта резко возрастает.

### **1.3.Защита от коррозии**

Исходя из ГОСТ Р 51164-и 98 ГОСТ 9.602-2016 подземные металлические сооружения подлежат защите от коррозии. Защиту подземных металлических сооружений можно разделить на:

- Пассивную- это изоляция поверхности металла от агрессивной среды путем нанесения различных защитных покрытий и легирование металла для повышения его коррозионной стойкости.
- Активную-это поляризация конструкций и сооружений (электрохимическая защита) (Подгорный, 1988).



Исходя из коррозионной активности среды, условий эксплуатации и особенностей конструкций выбирают способы защиты. Различают защитные покрытия нескольких типов:

- Органические (лакокрасочные, битумные, полимерные, каменноугольные, эпоксидные и др.);
- Неорганические (цементные, асбестоцементные, силикатные, фосфатные и др.);
- Металлические (защитные пленки, выполненные из металлов, обладающих меньшей скоростью коррозии, чем основной металл (хромирование, никелирование, оцинкование) (Подгорный, 1988).

Легирование металла с целью повышения его коррозионной стойкости заключается в добавках к сплавам компонентов, повышающих их пассивность, способствующих образованию на поверхности пассивных пленок или образующих слой продуктов коррозии с высокими защитными свойствами (например, легирование конструкционных сталей хромом, никелем, медью, кремнием, а также: удаление вредных примесей из сплавов, ускоряющих коррозию) (Подгорный, 1988).

При электрохимической защите защитный эффект достигается путем поляризации металлических сооружений и конструкций, помогающая снизить коррозионные процессы (Подгорный, 1988). От внешнего источника постоянного тока осуществляется поляризация, также путем соединения с металлом, который имеет более отрицательный или более положительный потенциал, чем у защищаемого металла. Различают катодную и анодную поляризацию (Улиг, Ревя, 1989).

Анодная защита основана на пассивации металла при анодной поляризации. Данный способ не нашел широкого применения, его стали применять только для защиты оборудования, который контактирует с сильноагрессивными жидкостями в химической промышленности (Улиг, Ревя, 1989).

Из-за смещения потенциала металла в отрицательную сторону по отношению к потенциалу коррозии, катодной защитой. происходит снижение скорости коррозии-это и называется (Бэкман,Швенк, 1984). Данный способ защиты является наиболее эффективным, и поэтому широко применяется для защиты металлов от коррозии.

Так как возникают ситуации, когда достичь необходимой степени защиты только с помощью одного из перечисленных методов не представляется возможным, применяют

несколько методов одновременно. Как правило, катодная защита применяется совместно с защитными изоляционными покрытиями металлов. Поскольку на данный момент нет изоляционного материала, который бы полностью защищал бы металл от коррозии, а также изоляция со временем теряет свои свойства, поэтому применяют одновременно защитное покрытие и электрохимическая защита для более долговременной и надежной защиты от коррозии подземных и подводных сооружений в условиях высокой агрессивности среды (Подгорный, 1988).

#### 1.4. Катодная защита

Катодная поляризация металлических сооружений с помощью внешних источников постоянного тока получила название катодной защиты. Катодная защита осуществляется с помощью установок катодной защиты (УКЗ). УКЗ состоит из следующих элементов:

- Источника постоянного тока, или станции катодной защиты (СКЗ);
- Анодного заземления;
- Контактного устройства на защищаемом сооружении (КИП точки дренажа);
- Кабельных и/или воздушных соединительных линий;
- Электрода сравнения длительного действия с датчиком электрохимического потенциала;
- Защитного заземления.

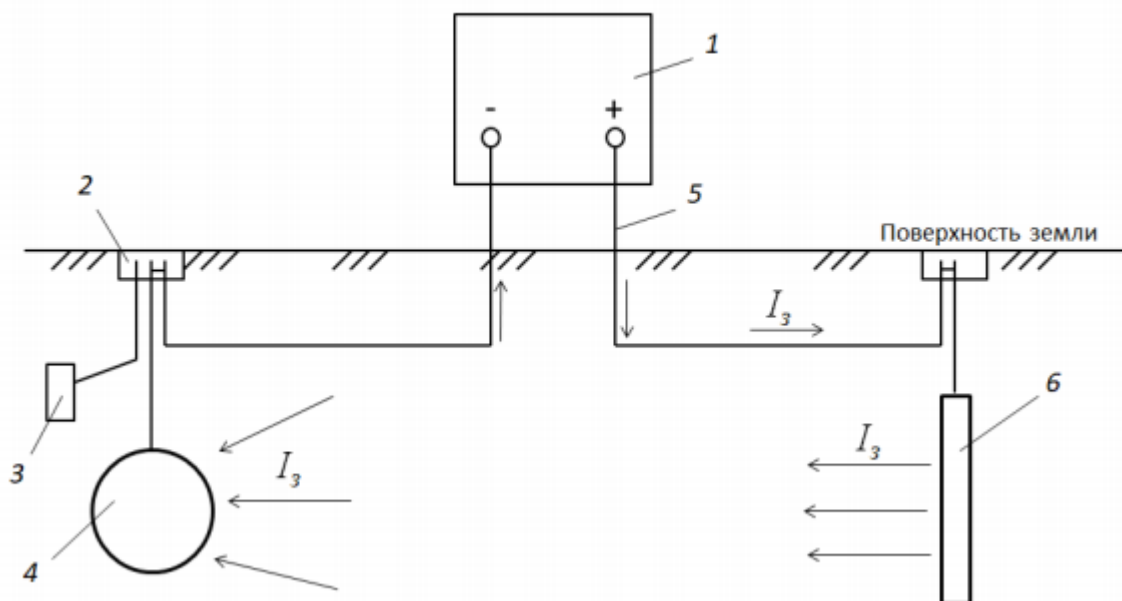


Рис. 2. Схема установки катодной защиты (Подгорный, 1988). 1 – источник постоянного тока; 2 – контактное устройство; 3 – электрод сравнения; 4 – защищаемое сооружение; 5 – соединительные линии; 6 – анодное заземление;  $I_z$  – защитный ток.

Отрицательный полюс станции катодной защиты присоединяется к защищаемому сооружению, а положительный – к анодному заземлению. К СКЗ могут быть подключены несколько сооружений. В этом случае, они подключаются через блок совместной защиты (БСЗ).

При включении источника ток стекает с анодного заземления, распространяется окружающей среде, натекает на сооружение и поляризует его металл. Защитный ток должен быть такой, чтобы создаваемый отрицательный потенциал находился в пределах установленных минимальных и максимальных защитных величин. (Бурлуцкий; 2020)

При меняющихся условиях параметров коррозионной среды и потенциала сооружения, защиту осуществляют установками автоматической катодной защиты. Данные установки представляют собой преобразователи, которые снабжены специальными блоками, обеспечивающими в зависимости от изменения потенциала, сооружения автоматическое регулирование электрических параметров защиты. Посредством регулировки тока или напряжения автоматическая установка катодной защиты поддерживает потенциал между защищаемым сооружением и окружающей средой в заданных пределах.

**Анодные заземления** установок катодной защиты служат для создания постоянного контакта положительного полюса источника тока с землей или с другой токопроводящей средой, окружающей сооружение. Анодное заземление является одним из основных элементов катодной установки, от его параметров зависит эффективность и надежность защиты от коррозии.

Электроды для анодных заземлений изготавливаются из стали, чугуна, железокремнистых сплавов (ферросилидов), графита (Бурлуцкий, 2020).

## Выводы к главе 1

1) Электрохимический механизм является главной составляющей в процессе подземной коррозии, из-за возникновения коррозионных гальванических элементов, которые дифференцируются на поверхности металла на анодные и катодные участки.

Процесс окисления металла с переносом его ионов в раствор электролита (коррозия) происходит на аноде, а на катоде – процесс восстановления избыточных электронов.

2) Скорость подземной коррозии зависит от таких факторов, как: воздухопроницаемости; типа и влажности грунта; растворенных в грунтовых водах; pH; состава и концентрации веществ, удельного электрического сопротивления грунтов.

3) Для защиты от коррозионных процессов используют установки катодной защиты. Данные установки используют постоянный электрический ток, протекающий от анодных заземлений к сооружению (нефте-, газопроводу), создавая на нем отрицательный потенциал, тем самым предотвращая коррозию.

4) Из-за постоянного тока катодной защиты возможны изменения состояния и свойств грунта.

## Глава 2. Коллоидно-химические свойства дисперсных грунтах

В разных дисперсных грунтах электрохимические процессы происходят с различной интенсивностью, либо не происходят вовсе, всё зависит от удельной поверхности грунта, чем она больше, тем сильнее протекают электрохимические процессы. Наибольшей удельной поверхностью обладают глинистые грунты, поэтому логичнее всего описывать электрохимические процессы на примере глинистых грунтов.

Для того, чтобы дать оценку анализа глинистых грунтов под действием токов катодной защиты, нужно дать понятие, что такое глинистый грунт. глинистый грунт: Связный грунт, состоящий в основном из пылеватых и глинистых (не менее 3%) частиц, обладающий свойством пластичности ( $I_p \geq 1\%$ ) (ГОСТ 25100-2011). По своему составу они подразделяются на глины, суглинки и супеси (Грунтоведение, 2005).

Глинистые породы широко распространены, их можно встретить начиная от докембрийских отложений и кончая современными образованиями, также они составляют более 65% всей массы осадочных пород (Грунтоведение, 2005). Глинистые грунты встречаются в виде мощных толщ, слоев, конусов выноса, линз, прослоев и т.п. Мощность их может изменяться от нескольких сантиметров до сотен метров.

Твердая компонента глинистых грунтов представляет собой полидисперсную систему. Супеси – это глинисто-пылевато-песчаная система с содержанием глинистых частиц 3—10%, глины — песчано-глинисто-пылеватая или песчано-пылевато-глинистая, с содержанием тех же частиц 30—60% и даже более (Грунтоведение, 2005).

Минеральный состав глинистых грунтов состоит из обломочных (песчаных и пылеватых) агрегатов и зерен, чаще всего кварцевого состава, и тонкодисперсных частиц глинистых минералов. В составе ледниковых, элювиальных, делювиальных, пролювиальных и др. глинистых грунтов, содержатся в себе крупнообломочные включения материала, различного по петрографическому составу (Грунтоведение, 2005). В отложениях открытых морей и засоленных лагун, а также в глинистых грунтах аридных зон можно встретить включения карбонатов и различных солей, свойственных для этих зон – это гипс, ангидрит, каменная соль. Также часто в глинистых отложениях можно встретить органическое вещество, чаще всего оно встречается в озерных глины, старично-аллювиальных и морских глинах. В зависимости от состава и количества примесей среди глинистых пород выделяют карбонатные, загипсованные и другие разновидности глинистых образований, а также глинистые грунты с примесью растительных остатков, количество которых должно составлять 5— 10% (Грунтоведение, 2005).

При формировании свойств глинистых грунтов наибольшую роль играют имеют минералы группы слоистых силикатов (гидрослюда, монтмориллонит, каолинит, хлорит), именно высокая дисперсность и слоистый тип структуры глинистых минералов определяет специфические свойства глинистых грунтов: высокая гидрофильность, липкость, способность к набуханию, ионному обмену и т.д. (Грунтоведение, 2005).

Из-за малых размеров глинистых частиц, и соответственно высокой удельной поверхностной энергии глинистых грунтов происходят различные поверхностные процессы, в том числе и электроповерхностные. (Грунтоведение, 2005).

### **2.1. Двойной электрический слой**

В 1807 г. было сделано открытие электрокинетического явления Фридрихом Рейссом, но теоретические объяснения были сделаны лишь в конце XIX в., поскольку появились представления об электрическом строении межфазной границы раздела «твердое тело-жидкость».

При контакте двух фаз, происходит перераспределение электрических зарядов между фазами так, что фазы заряжаются с противоположными знаками и с зарядами равной величины. Таким образом образуется система зарядов, которая получила название двойного электрического слоя (ДЭС), а между фазами возникает разность электрических потенциалов ( $\phi$ ). В дальнейшем, многие ученые изучали ДЭС, они сделали много открытий в этом направлении, например, представляли структуру двойного электрического слоя на границе раздела фаз в виде плоскопараллельного молекулярного конденсатора, внутренняя обкладка которого обусловлена зарядами твердого тела, а внешняя – зарядами, находящимися в газе или жидкости.

Носителями электрического заряда являются ионы в системе «коллоидные частицы – раствор электролита». Ионы внешней обкладки называются противоионами, а ионы, образующие внутреннюю обкладку и вызывающие возникновение межфазного потенциала, – потенциалопределяющими (Королев, 2015). В настоящее время общепринятой теорией является теория ДЭС О. Штерна. Разрабатывая схему строения ДЭС, О. Штерн объединил схемы Гельмгольца-Перрена и Гуи-Чепмэна, но в отличие от последних, где учитывалось лишь кулоновское взаимодействие противоионов с ионами внутренней обкладки, О. Штерн попытался также учесть роль специфической адсорбции противоионов под действием некулоновских (вандерваальсовых) сил и учесть размер

ионов (Королев, 2015). Основным положением в модели строения ДЭС О. Штерна является разделение "внешней" обкладки слоя противоионов на внутреннюю и внешнюю части. Внутреннюю часть образуют первый или несколько первых слоев противоионов, притягивающихся наиболее прочно к твердой поверхности под влиянием как электростатических, так и адсорбционных сил. Эта часть ДЭС называется "адсорбционным" слоем или «плотным слоем» (Королев, 2015).

О. Штерном построил свою теорию строения адсорбционного слоя на основе теории молекулярной адсорбции Ленгмюра и сделал выводы, что ионы не могут приблизиться к поверхности на расстояние меньше плоскости наибольшего приближения ионов, которые обусловлены размерами ионов и их гидратационной способностью (Королев, 2015). Толщина адсорбционного слоя определяется как расстояние между поверхностью и центром тяжести зарядов внутренней обкладки ДЭС (т.е. до плоскости, проходящей через центры ближайших к поверхности противоионов). Остальные противоионы, которые нужны для компенсации зарядов потенциалопределяющих ионов, образуют диффузную часть ДЭС, называемую диффузным слоем или слоем Гуи (Королев, 2015).

Вторым механизмом образования ДЭС является диссоциацией поверхностных ионогенных групп под влиянием полярной дисперсионной среды (Королев, 2015). Также образование ДЭС может быть связано не только с переходом ионов через границу раздела фаз в процессах специфической адсорбции и поверхностной диссоциации, но и что ДЭС может возникать и без ионных переходов, а в результате изоморфных замещений компонентов твердой фазы кристаллической решетки (например атома Si на атом Al и т. п.), при которых поглощается электрон извне и твердая фаза минерала приобретает отрицательный заряд (Королев, 2015), это было установлено при исследовании взаимодействия глинистых минералов с водными растворами электролитов.

На данный момент существует большое количество экспериментального материала о структуре ДЭС в различных системах, это позволяет выделить типы различных ДЭС. По количеству участвующих в данной системе фаз, можно разделить на простые (в двухфазной водонасыщенной системе) и сложные (в системах из трех и более фаз) (Королев, 2015). В зависимости от толщины поверхностных пленок или слоев воды разделяют на «неразвитый» или «тонкий» ДЭС (когда в силу малой толщины пленки, например в концентрированном растворе, отсутствует какая-либо периферийная часть двойного слоя, например диффузная) и «развитый» или «толстый» ДЭС, который

отвечает полностью сформированным составляющим его слоям, протяженным вглубь объема жидкости (Королев, 2015). Также, можно разделить на свободные и перекрывающиеся ДЭС, в зависимости от того, сближены или нет противоположащие границы раздела фаз на такие расстояния, что их ДЭС начинают взаимодействовать между собой, вызывая либо отталкивание (в случае одноименно заряженных ДЭС), либо взаимное притяжение. Учитывая геометрию поверхностей раздела фаз, а следовательно, и объемную конфигурацию ДЭС, последние подразделяются на плоские ДЭС, возникающие вблизи плоских границ раздела фаз, сферические (вокруг сферических и близких к ним границ раздела), цилиндрические ДЭС, а также ДЭС более сложной формы, в частности - ДЭС на шероховатой или пористой поверхности (Королев, 2015). Ещё разделяют по зависимости от параметров внешнего электрического поля на равновесный ДЭС, (возникающий в нулевом или постоянном электрическом поле) и неравновесный или поляризованный ДЭС ( возникающий при наличии переменного электрического поля). Как частный случай последнего типа ДЭС следует различать также стационарный ДЭС, квазиравновесность которого поддерживается стационарностью переменного электрического поля во времени (Королев, 2015).

### **Теория двойного электрического слоя в глинистых грунтах.**

Механизм возникновения и свойства ДЭС В глинистых грунтах механизм и свойства ДЭС на данный момент хорошо изучены. При соприкосновении твердых минеральных частиц с водой и водными растворами качество их поверхности существенно изменяется - происходят процессы взаимодействия полярного растворителя с адсорбционными центрами твердой поверхности, появляются дополнительные поверхностные активные центры (Королев, 2015). Так, за счет поверхностной диссоциации глинистых минералов происходит адсорбция некоторых ионов из раствора и другие процессы, которые обусловлены кристаллохимическим строением дисперсных минералов, свойствами окружающего раствора, его концентрацией, зарядом ионов и величиной pH.

Гидратация поверхности дисперсных минералов в грунтах происходит в два этапа. Первый этап гидратации: преобладают процессы взаимодействия молекул воды с наиболее активными центрами адсорбции — координационно-ненасыщенными атомами и ионами решетки, а также ионами-компенсаторами ее заряда – обменными катионами ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ ). Закономерности гидратации ионов связаны в основном с их



валентностью и размерами (Королев, 2015), чем выше отношение этих параметров, тем больше гидратируемость ионов ( $\text{Fe}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ ). При этом следует учитывать и степень их взаимодействия с поверхностью. Процесс гидратации ионов ослабляет это взаимодействие и способствует их отхождению от поверхности в объем раствора, то есть «диссоциации» (Королев, 2015).

Способность ионов к поверхностной диссоциации оценивается степенью взаимодействия их с поверхностью, на что оказывает влияние плотность поверхностного заряда иона (чем она выше, тем взаимодействие сильнее) и местоположение иона относительно поверхности после гидратации. В связи с этим ряд гидратируемости ионов отличается от вышеприведенного ряда их поверхностной «диссоциируемости»: ( $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Fe}^{3+}$ ); при этом ион  $\text{K}^+$  часто вообще исключается из этого ряда, так как из-за низкой степени гидратируемости, он может компенсировать поверхностные заряды на коротких расстояниях, утрачивая при этом способность к диссоциации (Злочевская, Королев, 1988).

На процесс диссоциации некоторых поверхностных вторичных ОН-групп большое влияние оказывает рН раствора (Злочевская, Королев, 1988). Так как дисперсные минералы являются полярными адсорбентами, которые активно взаимодействуют с водой, то для них характерна «отрицательная» физическая адсорбция ионов из раствора (Королев, 2015). Также может происходить и «положительная» «специфическая» адсорбция ионов на таких поверхностях, но она происходит только в определенных условиях, таких как:

1. Химическая сорбция (хемосорбция) отдельных ионов возможна в том случае, когда они образуют нерастворимое химическое соединение с ионами минеральной поверхности грунта.

2. Сверхэквивалентная адсорбция многовалентных ионов ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и др.) может происходить как на заряженных, так и на незаряженных участках минеральной поверхности, либо при возникновении межмолекулярных ван-дер-ваальсовых сил, но дисперсионные силы проявляются как результат поляризующего действия ионов на электронные оболочки атомов, в результате чего возбуждаются направленные колебания электронов и происходит их взаимодействие.

3. Избирательная адсорбция может происходить в том случае, если они являются или изоморфными. В таком случае при адсорбции идет достройка структуры

кристаллической решетки минерала, причем часть заряда адсорбируемого иона остается свободной, сообщая остаточный заряд поверхности кристалла. Отсюда, в системе "глинистый грунт - водный раствор электролита" на поверхности твердых минеральных частиц образуется множество качественно разнообразных адсорбционных центров, природа которых зависит как от кристаллохимии поверхности, так и от взаимодействующего раствора (Королев, 2015).

Величина и знак электрического заряда частиц является результатом статистического распределения различных ионогенных групп на минеральной поверхности. Двойной электрический слой (ДЭС) образуется из-за избытка ионов одного знака или «заряда» поверхности, который вызывает силу электрического притяжения. При низкой концентрации взаимодействующего с породой раствора наличие вблизи поверхности избыточной по отношению к раствору концентрации приповерхностных ионов, образовавшихся за счет поверхностной диссоциации минералов, способствует процессу "осмотического" перетока в область дополнительного количества влаги (Королев, 2015).

Далее процесс переходит во второй этап гидратации из стадии адсорбции воды на активных центрах в "осмотическое" впитывания влаги из раствора и формирования диффузной части ДЭС. Ионы, которые остались на поверхности твердой минеральной фазы и сообщают ей определенный знак и величину заряда, являются потенциалопределяющими, а перешедшие в приповерхностную область порового раствора ионы противоположного знака - противоионами. Специфически адсорбированные ионы определяют, как потенциалопределяющие, так как они обычно притягивают противоионы, однако эти ионы составляют адсорбционный слой.

Образование ДЭС в глинистых грунтах полагают, что связана с «диссоциацией» поверхностных ионогенных групп, которые содержат строго локализованные вблизи них противоионы обуславливает преобладание противоионов ДЭС в пристенной области (до 90%), по сравнению с диффузной (Злочевская, 1969). При повышенной концентрации взаимодействующего раствора процессы поверхностной диссоциации ионов подавлены, «осмотический» переток влаги отсутствует, ионы диффузного слоя оказываются в пристенной части ДЭС (Королев, 2015).

Противоионы ДЭС непрерывно обмениваются с ионами раствора того же знака, обуславливая при этом так называемые обменные реакции в грунтах. Основные закономерности ионного обмена:

1. Реакции обмена в строго эквивалентных соотношениях, являются в основном обратимыми (если не сопровождаются хемосорбцией или, или адсорбцией многовалентных ионов), скорость реакции обмена несколько медленнее, чем физическая адсорбция, особенно в случае обмена в межслоевом пространстве набухающих минералов.

2. Интенсивность обмена зависит от валентности ионов в растворе, их радиуса, концентрации в растворе, соотношения жидкой и твердой фаз: чем все эти параметры больше, тем выше скорость реакции обмена и энергия вхождения ионов в обменный комплекс грунта.

3. Ряд ионов по энергии их вытеснения из обменного состояния соответствует лиотропному ряду:

для катионов:  $Ba^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+ > Li^+$ ;

для анионов:  $SiO_3^{2-} > SiO_4^{2-} > CO_3^{2-} > SO_4^{2-} > Cl^-$ .

4. С ростом pH раствора увеличивается процесс катионного обмена, с уменьшением pH – анионного обмена. Если обменивающимися ионами минерала являются  $H^+$  или  $OH^-$ , то pH взаимодействующего раствора может измениться (Королев, 2015).

Ионообменные процессы играют важную роль при формировании свойств ДЭС. Однако, нельзя не учитывать состав, структуру и свойства самой жидкой фазы грунтов, тк она оказывает воздействие на их электроповерхностные свойства, поскольку процессы формирования ДЭС и ионообменные реакции протекают, прежде всего, в жидкой среде.

## **2.2. Электрокинетические явления в дисперсных грунтах**

При внешней разности потенциалов у твердой поверхности ДЭС, приложенной параллельно этой поверхности, то это приводит при разноимённости зарядов твердой и жидкой фаз, в случае неподвижного капиллярно-пористого тела в электрическом поле, к перемещению противоионов диффузного слоя с жидкой фазой к соответствующему полюсу. Именно по такому механизму действуют процессы электроосмоса и электрофореза.

Так при процессе электроосмоса воды через отрицательно заряженную пористую диафрагму катионы подвижной части ДЭС движутся со скоростью  $v_{эо}$ , в сторону отрицательного электрода — катода, увлекая за собой и молекулы воды вследствие вязкого трения. Напротив, в процессе электрофореза отрицательно заряженная частица стремится сместиться со скоростью  $v_{эф}$  к противоположному положительному полюсу - к аноду.

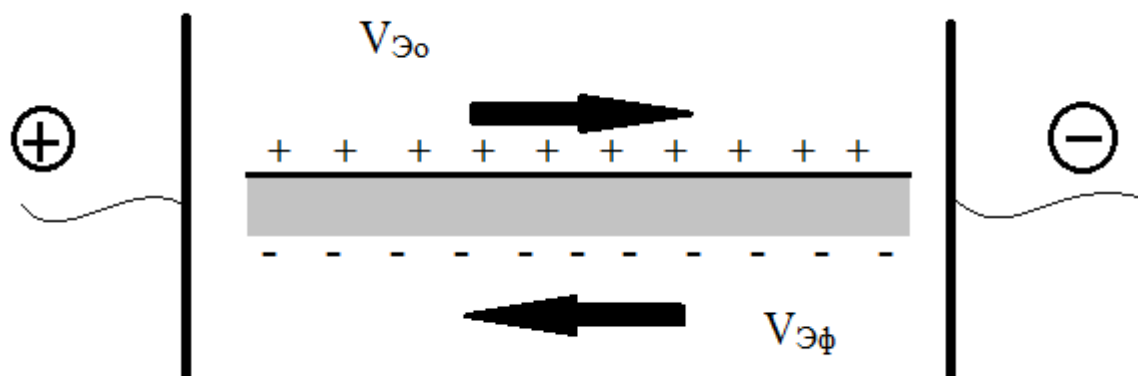


Рис.3. Механизм электрокинетических явлений (Королев, 2015).

По плоскости скольжения, т.е. на некотором расстоянии от межфазной границы происходит скольжение твердой фазы подвижных ионов ДЭС и молекул жидкости, т.к. их подвижность неодинакова. Максимальное значение скорости скольжения жидкости будет наблюдаться за границей ДЭС, и нелинейно убывать по мере приближения к поверхности. При этом разность потенциалов между частью жидкости, не вовлеченной в движение, связанной с твердой фазой и между всем остальным раствором, характеризуется электрокинетическим или  $\zeta$ -потенциалом, который поддается непосредственному экспериментальному определению (Злочевская, Королев, 1988).

Однако место границы скольжения жидкости в рамках модели Штерна до сих пор остается неясным, и в общем случае ее представляют либо находящейся в диффузном слое, либо совпадающей с границей адсорбционного слоя (Королев, 2015).

Многие исследования говорят, что величина  $\zeta$ -потенциала зависит от влажности среды, температуры, природы фаз и других факторов, а также интенсивность электрокинетических явлений будет тем больше, чем больше зарядов диффузного слоя окажется в подвижной части жидкости, то есть чем толще ДЭС (Королев, 2015).

### 2.3. Электроосмос в дисперсных грунтах

Электроосмос – это перенос жидкости в капиллярно-пористых системах под действием внешнего постоянного электрического поля. Процесс электроосмоса обуславливается наличием на границе раздела твердой и жидкой фаз в капиллярнопористых системах ДЭС. При электроосмосе воды через отрицательно заряженную диафрагму катионы подвижной части ДЭС движутся в сторону отрицательного электрода и увлекают за собой молекулы воды. Так, при относительном перемещении фаз происходит смещение ДЭС по плоскости скольжения. Отсюда, интенсивность электрокинетических явлений прямо пропорционально зарядам диффузного слоя, которые окажутся в подвижной части жидкости, т.е. тем больше зарядов, тем больше интенсивность и наоборот.

Современная теория электроосмоса в глинистых грунтах базируется на представлениях Г. Гельмгольца и М. Смолуховского и полученном ими классическом уравнением для линейной скорости движения жидкости при электроосмосе:

$$v_{эо} = \frac{\varepsilon \zeta E}{4\pi\eta} \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость порового раствора;  $\eta$  – вязкость порового раствора;  $v_{эо}$  – линейная скорость движения порового раствора относительно скелета глины;  $E$  – напряженность внешнего электрического поля;  $\zeta$  – электрокинетический потенциал.

Заметим, что уравнение не содержит геометрических параметров системы; оно справедливо как для одиночных капилляров, так и для сложных капиллярно-пористых систем.

Различия между толщиной ДЭС и радиусом пор в глинистых грунтах сильно варьируют в зависимости от степени их литификации, состава и концентрации порового раствора. Так как, действительную линейную скорость электроосмотического движения жидкости в глинах  $v_{эо}$  измерить невозможно, так же как и площадь поперечного сечения фильтрации пор ( $\omega$ ), то для обработки экспериментальных данных электроосмоса глин вместо линейной  $v_{эо}$  используют объемную  $Q_{эо}$  скорость электроосмотического движения жидкости (Королев, 2015):

$$Q_{эо} = v_{эо} * \omega \quad (7)$$

С учетом данного уравнение Гельмгольца – Смолуховского приобретает вид, удобный для экспериментального анализа электроосмоса в глинах:

$$\frac{Q_{\text{эо}}}{I} = \frac{\varepsilon\zeta}{4\pi\eta(\chi_v - \chi_s)} = P_{\text{эо}} \quad (8)$$

Где  $I$  – сила электрического тока;  $P_{\text{эо}}$  – электроосмотический перенос;  $\chi_v$  – удельная электропроводность равновесного порового раствора;  $\chi_s$  – поверхностная проводимость.

Преобразуя уравнение получаем:

$$\frac{Q_{\text{эо}}}{E} = \frac{Q_{\text{эо}}l}{U} = \frac{\varepsilon\zeta\omega}{4\pi\eta} = \omega K_{\text{эо}} \quad (9)$$

Где  $\omega$  – коэффициент электроосмоса;  $l$  – расстояние между электродами.

Понятие коэффициента электроосмоса ( $K_{\text{эо}}$ ) было впервые введено в научный оборот в 1940 г. Б. Ф. Рельтовым. Его величина для разных грунтов лежит в диапазоне  $10^{-5}$  –  $10^{-4}$  см<sup>2</sup>/В·с (Королев, 2015).

С учетом этого уравнение для скорости электроосмоса принимает простой вид:

$$Q_{\text{эо}} = \omega K_{\text{эо}} E \quad (10)$$

На практике величину  $K_{\text{эо}}$  определяют экспериментально по формуле:

$$K_{\text{эо}} = \frac{Q_{\text{эо}}l}{U\omega} \quad (11)$$

Данные уравнения позволяют по экспериментальным данным изучения электроосмоса в грунте рассчитать его  $\zeta$ -потенциал (Королев, 2015).

При изучении электроосмотического осушения грунта Б. А. Ржаницын предложил формулу для определения количества выделяющейся из грунта воды; в уравнение показывалось, что осушение грунта с заметным его уплотнением начинается в анодной зоне и распространяется в направлении к катоду, уплотнение и упрочнение наблюдается также и в межэлектродной зоне (Королев, 2015).

При проведении лабораторных исследований Б. Ф. Рельтов, а также независимо от него Д. Маклина и Д. Рольфа обнаружили, что количество воды, которая выделяется из грунта при электроосмосе, прямо пропорционально количеству затраченного электричества. Д. Маклин и Д. Рольф утверждали, что эта пропорциональность

сохраняется очень непродолжительное время; Б. Ф. Рельтов же проследил ее проявление в течение 90 – 100 ч (Королев, 2015). Также, Д. Маклин и Д. Рольф установили, что степень осушения зависит от типа грунта при одинаковой затрате электричества: так, наибольшее количество воды выделяется из супесей, меньшее – из суглинков и еще меньшее из глины. Отсюда следует, что между содержанием глинистых частиц в грунте и расходом электрического тока на 1 г выделяемой воды существует линейная зависимость (Королев, 2015).

Такую же зависимость в 1951 г. обнаружил Г. Н. Жинкин, он установил, что каждый тип грунта имеет свой показатель осушения, который определяется в количестве электричества, затраченного на выделение 1 см<sup>3</sup> воды. Данный показатель осушения не зависит от режима тока, но резко меняется с изменением гранулометрического и минерального состава грунта, а также его первоначальной влажности (Королев, 2015). Опыты показали, что наименьший показатель осушения имеют супесчаные грунты, а наибольший – глины, и показатель осушения суглинков, соответственно, имеет промежуточное значение.

Большой вклад в изучение электроосмоса внесли В. Шаад и Р. Хефели. Они рассмотрели совместное действие на грунт гидравлической и электроосмотической фильтрации, нашли новое математическое выражение закономерности электроосмотического осушения, а также дали ряд новых понятий и теоретических положений. Они дали рекомендации определять электроосмотическую высоту подъема как разность уровней воды на катоде и аноде при напряжении  $U$  по уравнению:

$$h_{э} = \frac{K_{эо}}{K_{ф}} \quad (12)$$

Где  $h_{э}$  – удельная электроосмотическая высота подъема при напряжении  $U = 1$  В;  $K_{эо}$  – коэффициент электроосмоса в см<sup>2</sup>/В·с;  $K_{ф}$  – коэффициент фильтрации в см/с.

Отсюда, удельная высота подъема прямо пропорциональна коэффициенту электроосмоса и обратно пропорциональна коэффициенту фильтрации. По удельной высоте можно определить, какова степень активности процесса электроосмотической фильтрации относительно гидравлической фильтрации; высоту  $h_{э}$  можно считать измерителем электроосмотического эффекта (Королев, 2015).

#### 2.4. Факторы, влияющие на электроосмос в грунтах.

Величина электроосмотического переноса воды ( $P_{эо}$ ) и  $\zeta$ -потенциал в глинистых грунтах зависит от различных факторов, которые можно разделить на две группы:

- **Внутренние факторы:** химикоминеральный состав грунта, гранулометрический состав (дисперсность), плотность-влажность грунта, состав обменных катионов и концентрация электролита порового раствора, его pH и др.
- **Внешние факторы:** температура и давление, параметры внешнего электрического поля и др.

**Влияние минерального состава** на электроосмос в грунтах связано с дисперсностью и гидрофильностью составляющих их минералов, а также через природу данной минеральной поверхности. Последнее заключается через влияние термодинамического  $\varphi_o$ -потенциала поверхности данного минерала на величину  $\zeta$ -потенциала и электроосмотического переноса  $P_{эо}$ : при прочих равных условиях чем выше  $\varphi_o$ -потенциал, тем больше значения  $\zeta$ -потенциала и электроосмотического переноса  $P_{эо}$ , поскольку величина  $P_{эо}$  (как величина  $K_{эо}$ ) пропорциональна  $\zeta$ -потенциалу. В свою очередь  $\zeta$ -потенциал минералов определяется типом кристаллической структуры и особенностями изоморфных замещений (Королев, 2015).

А. Т. Соколовским и Р. И. Злочевской исследовали влияние минерального состава глин на  $K_{эо}$  и установили, что в поле постоянного электрического тока при одинаковой влажности глин максимальные значения характерны для монтморилонитовой глины, чуть меньшие значения отмечаются у гидрослюдистой синей кембрийской глине и каолиновой глин, самыми низкими значениями обладают полиминеральные полидисперсные глины – аллювиальный суглинок и аллювиальная супесь, имеющие преимущественно иллитовый состав глинистой фракции (Королев, 2015).

Несмотря на данное сравнение величин  $K_{эо}$  различных по минеральному составу глин не вполне точно, так как эти грунты одновременно имеют и разную дисперсность. При близких значениях  $\varphi_o$ -потенциала минералов, слагающих данные грунты, величина  $K_{эо}$  скорее будет определяться их различной дисперсностью.

**Влияние дисперсности** на величину  $K_{эо}$ , и на другие параметры электроосмоса более определено: с ростом дисперсности при прочих равных условиях возрастает доля порового пространства, занятая диффузной частью ДЭС, а чем их больше в единице объема пор, тем выше скорость электроосмоса и  $K_{эо}$ . Так как среди основных групп



глинистых минералов дисперсность их уменьшается в ряду: смектиты > иллиты > каолиниты, то прямо пропорционально уменьшается величина  $K_{эо}$ . В общем случае при прочих равных условиях в зависимости от гранулометрического состава грунтов их коэффициент электроосмоса  $K_{эо}$  и  $P_{эо}$  уменьшаются в ряду тяжелые глины > глины > суглинки > супеси > пески. В песках электроосмос может вообще отсутствовать из-за незначительной роли ДЭС в их поровом пространстве (Королев, 2015).

**Влияние состава обменных катионов** в глинистых грунтах на  $\zeta$ -потенциал и параметры электроосмоса было проведено множество исследований. В данных исследованиях установили, что влияние обменного комплекса на величину  $K_{эо}$  для глин разного минерального состава неоднозначно. Например, для глин каолинитового состава максимальное значение соответствует  $K^+$  - и  $Na^+$  -формам, а наименьшие –  $Ca^{2+}$  -форме, так как у глин, содержащих одновалентные катионы, толщина ДЭС выше, чем у образцов с двухвалентными катионами (Королев, 2015).

Для монтморилонитовых глин, так как их дисперсностью намного больше, размер пор соизмерим с толщиной диффузного слоя, и отсюда следует, что зависимость  $K_{эо}$  от состава обменных катионов за счет большего перекрытия ДЭС в случае одновалентных катионов имеет обратный характер: величина  $K_{эо}$  увеличивается в ряду Na-форма < K-форма < Ca-форма. Но в отсутствие перекрытия одноименных ДЭС, значения коэффициента электроосмоса  $K_{эо}$  монтморилонитовых глин в зависимости от состава обменных катионов, как и у каолинитов, увеличивается в ряду Ca-форма < K-форма < Na-форма (Королев, 2015).

**Влажность** глин является важным фактором, влияющим на параметры электроосмоса. Заметное передвижение порового раствора в глинах при электроосмосе практически начинается лишь при влажности, близкой к нижнему пределу пластичности ( $W_p$ ), то есть в условиях существования сплошного слоя воды в порах породы, содержащей «осмотически поглощенную» влагу в пределах диффузной части ДЭС (Королев, 2015). При увеличении влажности выше предела пластичности происходит увеличению  $K_{эо}$ ,  $P_{эо}$  и  $\zeta$ -потенциала, данное увеличение происходит из-за увеличения диффузного слоя, но и из-за увеличения диаметра пор данного образца. Данный процесс протекает до полного водопоглощения глин  $W_{sw}$ , при которой параметры электроосмоса ( $K_{эо}$  и  $P_{эо}$ ) достигают своих максимальных значений (Королев, 2015).

Водопоглощение глинистых грунтов увеличивается с ростом емкости обмена глин, уменьшением заряда обменных катионов и величины их радиуса. При этом удельное

водопоглощение глин тем выше, чем значительнее толщина диффузного слоя ДЭС, больше их  $\zeta$ -потенциал, а следовательно и величина  $K_{эо}$ . Несмотря на это водопоглощение глин в основном связана с увеличением дисперсности их частиц, и толщина поверхностного слоя воды вокруг частиц может быть в этом случае относительно небольшой; но при этом для высокой дисперсности характерно уменьшение  $\zeta$ -потенциала, а также падение величин  $K_{эо}$  и  $P_{эо}$ . Также важно учитывать не только рост концентрации противоионов ДЭС, но и гидравлическое сопротивление электроосмосу граничного слоя воды, особенности строения порового пространства глин и другие факторы (Королев, 2015).

Зависимости  $K_{эо}$  и  $P_{эо}$  от  $W$  нелинейны, где максимум мы можем увидеть при  $W_{sw}$ . Сначала увеличение электроосмотического переноса  $K_{эо}$  и  $P_{эо}$  с ростом влажности глин связано с увеличением толщины поверхностных слоев воды в поровом пространстве глин и уменьшением при этом степени перекрытия ионных атмосфер ДЭС, полное развитие которых в глинах происходит вплоть до влажности свободного набухания ( $W_{sw}$ ) (Королев, 2015). Снижение величин электроосмоса ( $K_{эо}$  и  $P_{эо}$ ) при более высоких влажностях ( $W \gg W_{sw}$ ) связано с проявлением процесса, обратного электроосмосу, - электрофореза отдельных глинистых частиц в условиях увеличивающегося объема дисперсной среды – поровой воды, снижающего электроосмотический перенос.

Таким образом, любое воздействие на капиллярно-пористую систему, способствующее увеличению средней объемной концентрации противоионов ДЭС, сопровождается уменьшением электроосмотического переноса  $P_{эо}$ . Но поскольку рост концентрации противоионов ДЭС в значительной степени связан с объемом влаги в пределах ДЭС, то уменьшение толщины поверхностных слоев воды, обусловленное любыми причинами будет приводить к снижению скорости электроосмотического переноса (Королев, 2015).

**Влияние концентрации** электролита порового раствора на электроосмотический перенос проявляется достаточно отчетливо. Анализируя зависимости  $K_{эо}$  и  $P_{эо}$  от концентрации порового раствора электролита в глинах при одинаковых характеристиках влажности (и прочих одинаковых условиях), следует отметить, что для глин подтверждаются закономерности, установленные для всевозможных капиллярнопористых систем и диафрагм: с увеличением концентрации электролита происходит сжатие толщины ДЭС и вследствие этого снижаются значения  $\zeta$ -потенциала, а следовательно, и величины  $K_{эо}$  и  $P_{эо}$  (Королев, 2015). Вместе с тем имеются экспериментальные данные,

которые пока не сопровождаются теоритическим обоснованием, свидетельствующие о том, что перенос жидкости в глинах от анода к катоду происходит при очень больших концентрациях как в кислых, так и в щелочных растворах (Королев, 2015).

Значения величин электроосмотического расхода могут колебаться в пределах нескольких порядков в зависимости от начальной влажности грунта, его емкости обмена, содержания свободного электролита и типа глинистого грунта (минеральный состав, дисперсность, микроструктура). Влияние степени минерализации порового раствора на  $K_{эо}$  проявляется в глинистых породах таким же образом, как и при изменении  $\zeta$ -потенциала: в общем случае уменьшается с ростом концентрации раствора электролита в поровом растворе (Королев, 2015).

**Влияние рН** порового раствора на изменения электроосмотических параметров на данный момент изучено плохо. Роль рН порового раствора при электроосмосе в глинах следует рассматривать независимо от щелочности или кислотности порового раствора, по мере увеличения концентрации ионов гидроксила в щелочной области или ионов водорода в кислой области происходит увеличение электроосмотического переноса ( $P_{эо}$ ) (Королев, 2015).

**Влияние микроорганизмов** в дисперсных грунтах, обуславливается их влиянием на электрокинетические свойства дисперсных частиц грунтов, которые изменяют заряды частиц, например, при адсорбции на частицах минералов отрицательно заряженных клеток или продуктов метаболизма микроорганизмов, функциональные группы которых могут иметь как положительный, так и отрицательный заряды (Королев, 2015).

Электроповерхностные свойства микроорганизмов определяются наличием на их поверхности тех или иных ионогенных групп в диссоциированном состоянии. Степень их диссоциации зависит от рН среды, при изменении которой меняется электрофоретическая подвижность ряда микроорганизмов. Для некоторых микробных клеток зависимость  $\zeta$ -потенциала от концентрации раствора электролита имеет вид, аналогичный тому, что и для глинистых минералов (Королев, 2015). Наличие относительно высокого отрицательного  $\zeta$ -потенциала у микроорганизмов способно существенным образом влиять на распределение общего  $\zeta$ -потенциала дисперсного грунта, содержащего те или иные микроорганизмы, а следовательно, влиять и на величины  $K_{эо}$  и  $P_{эо}$  (Королев, 2015). Внешние факторы влияющие на электроосмос в дисперсных грунтах: температура и параметры прикладываемого внешнего электрического поля (напряженность и др.).

**Влияние температуры** увеличение электропроводности ( $\chi_v + \chi_s$ ) в тонком слое влаги при нагревании будет приводить к снижению электроосмотического переноса  $P_{эо}$ . При этом поверхностная проводимость ( $\chi_s$ ) возрастает при нагревание сильнее, чем  $\chi_v$ . Что же касается температурной зависимости коэффициент электроосмоса при изменение температуры оценить сложнее, так как есть сложности в изменение параметров  $\zeta$ ,  $\varepsilon$  и  $\eta$  с температурой, которые входят в выражение для  $K_{эо}$ . Но смотря на экспериментальные данные величина коэффициента электроосмоса  $K_{эо}$  возрастает с температурой (Королев, 2015). Отсюда, влияние температуры на электроосмотический перенос определяется соотношением величин ( $\chi_v + \chi_s$ ) и  $K_{эо}$ , меняющихся с температурой.

**Влияние напряженности электрического поля** постоянного тока ( $E$ ) на электроосмотическую фильтрацию воды в глинистых грунтах имеет сложный характер. Начальный градиент напряжения электрического поля  $E_o$ , при котором впервые обнаруживается электроосмотический перенос, зависит от минерального и гранулометрического состава глин. Увеличение  $E_o$  связано либо с более высокой дисперсностью глин, либо существенно влияние на  $E_o$  оказывает низкая электрохимическая активность (незначительное содержание глинистой фракции) и существенная неоднородность порового пространства (Королев, 2015). При увеличении  $E$  в величину  $P_{эо}$  вовлекается все большее количество противоионов ДЭС, что приводит к росту  $K_{эо}$  вплоть до достижения некоторого критического (первого) градиента напряжения электрического поля  $E_{кр}'$ , способного привести в движение все ионы диффузной части ДЭС (Королев, 2015). В результате при этом устанавливается стационарный ламинарный электроосмотический поток жидкости. Постоянство  $K_{эо}$  сохраняется вплоть до значения величины (второго) критического градиента  $E_{кр}''$ , выше которого наблюдается резкое увеличение коэффициента электроосмоса в 2-2,5 раза. При дальнейшем увеличении  $E$  коэффициент электроосмоса вновь остается практически постоянным. Резкое увеличение  $K_{эо}$  при напряженности  $E \gg E_{кр}''$  объясняется особыми реологическими свойствами граничных фаз поровой жидкости вблизи твердой поверхности глинистых грунтов, который при  $E < E_{кр}''$  не участвуют в электроосмотической фильтрации ввиду наличия существенной сдвиговой прочности у этих слоев (Королев, 2015). При напряжении  $E > E_{кр}''$  в движение вовлекается уже не только объемная часть жидкости, но и ее граничная фаза, в результате чего резко возрастает коэффициент электроосмоса  $K_{эо}$ . Если при  $E < E_{кр}''$  в движении принимают участие только ионы диффузной части ДЭС, то при  $E > E_{кр}''$  в движение вовлекаются и ионы адсорбционного (пристенного) слоя. В результате,

при высокой напряженности  $E$  в глинистых грунтах весь ДЭС вовлекается в электроосмотическое движение.

## 2.5. Электрофорез в дисперсных грунтах

Электрофорез - движение заряженных частиц под действием внешнего электрического поля, осуществим в грунтах лишь в ограниченных условиях. Во многих дисперсных грунтах из-за того, что частицы находятся не в свободном состоянии, а имеют различные структурные связи, поэтому в таких грунтах процесс электрофореза не происходит. Чем выше прочность структурных связей, тем большую энергию надо затратить на отрыв частиц друг от друга для последующего вовлечения их в электрофоретический поток. С другой точки зрения, из-за сложного строения пористой системы грунта свободные дисперсные частицы чаще всего не могут свободно перемещаться под действием электрофореза. Ограниченность электрофоретической подвижности частиц в большинстве дисперсных грунтов обуславливает малое применение электрофореза для грунтов, однако полностью его не исключает (Королев, 2015).

Таким образом, основными условиями протекания электрофореза частиц в грунтах являются:

- 1) наличие в грунте свобододисперсных заряженных частиц;
- 2) наличие в грунте открытой пористости и относительно широких сообщающихся поровых каналов или свободная жидкой дисперсионной среды, в которой могла бы осуществляться электрофоретическая подвижность частиц;
- 3) наличие внешнего электрического поля.

Линейная скорость электрофореза частиц грунта ( $v_{эф}$ ), имеющих определенный  $\zeta$  потенциал в среде с диэлектрической постоянной  $\epsilon$  и вязкостью  $\eta$ , в поле напряженностью  $E$  описывается уравнением Смолуховского:

$$v_{эф} = \frac{\epsilon \zeta E}{4\pi\eta} \quad (13)$$

Если известно число частиц ( $N$ ), двигающихся под действием электрофореза в единице объема грунта, можно определить их общий поток ( $J_{эф}$ ) в грунте:

$$J_{\text{эф}} = v_{\text{эф}}N = \frac{k_1 \varepsilon \zeta EN}{4\pi\eta} \quad (14),$$

где  $k_1$  – численный коэффициент.

Из уравнений на скорость электрофореза  $v_{\text{эф}}$  грунтовых частиц влияют те же факторы, что и в случае электроосмоса (Королев, 2015). Например, скорость электрофореза частиц  $v_{\text{эф}}$  прямо пропорциональна величине их  $\zeta$ -потенциала и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  дисперсионной среды (порового раствора, взаимодействующего с грунтом) и обратно пропорциональна вязкости  $\eta$  дисперсионной среды. Отсюда, факторы, которые влияют на  $\zeta$ -потенциал, также оказывают влияние и на величину  $v_{\text{эф}}$  грунтовых частиц. А точнее скорость электрофореза  $v_{\text{эф}}$  грунтовых частиц будет возрастать с уменьшением концентрации электролита порового раствора и увеличением заряда частиц и их потенциала  $\varphi_0$ . Также, при прочих равных условиях скорость электрофореза грунтовых частиц будет определяться и составом обменного комплекса грунта; она будет возрастать при наличии в ДЭС частиц катионов разной валентности в ряду:  $K^+ > K^{2+} > K^{3+}$  (Королев, 2015).

Нельзя не отметить, что грунт является многокомпонентной системой, которая содержит минеральные частицы, а также могут содержаться различные органо-минеральные и биотические компоненты, несущие на своей поверхности электрический заряд, то в грунтах возможен и электрофорез этих частиц. Особую роль приобретает в грунтах электрофорез наночастиц, представленных заряженными токсичными частицами – загрязнителями грунтов (ионными комплексами, ионными соединениями и т. п.).

## **2.6. Электрокоагуляция и преобразование структуры грунтов**

Из-за электрокинетических и электрохимических процессов дисперсные грунты изменяют свою структура под действием постоянного электрического тока. Структурные преобразования в дисперсном грунте будут различны в зависимости от исходного состояния грунта и степени его литификации. К примеру, нелитифицированные дисперсные грунты или современные осадки, не прошедшие стадию диагенеза наиболее подвержены структурным изменениям.

Из-за электроосмотического обезвоживания, коагуляции глинистых частиц и образованию агрегатов частиц в результате действия гидратов окиси алюминия или

железа происходит изменения свойств дисперсных грунтов, таких как изменение структуры, уменьшение их набухаемости и усадки, снижение липкости, увеличение угла внутреннего трения и т.п.

Важную практическую роль воздействия постоянного электрического тока на грунты имеет преобразование структуры современных природных или искусственных осадков для получения требуемой структуры грунта. Например, применяется для очистки сточных вод и ускорения осаждения высокодисперсных осадков в хвостохранилищах.

Электрокоагуляция - это процесс ускорения коагуляции осадков дисперсных частиц в поле постоянного электрического тока за счет электродных процессов и увеличения при этом в растворе концентрации многовалентных ионов металлов, слагающих электроды и вызывающих эту коагуляцию. электрофорез частиц имеет важную роль в данном процессе, так как происходит усиление соударения частиц и образование агрегатов.

В процессе коагуляции выделяют две стадии:

- 1) сближение первоначально удаленных друг от друга частиц;
- 2) их взаимодействие (слипание) на малых расстояниях.

При действии внешнего электрического поля обе стадии изменяются: за счет электрофореза частицы сближаются у одного из электродов, это создает условия для протекания второй стадии – их активной коагуляции. Происходит деформирование ДЭС во внешнем электрическом поле, а при нарушении его симметрии происходит увеличение соударения частиц.

Под действием электрического поля дисперсные грунты в результате электрокоагуляции и электрокинетических явлений претерпевают сильные изменения в своей структуре. Особенно сильно микроструктурные преобразования происходят при электроосмосе дисперсных грунтов в их приэлектродных катодной и анодной зонах. Основными причинами, вызывающими структурные преобразования грунтов при воздействии электрического тока, являются:

- 1) уплотнение грунта в анодной зоне за счет электроосмотического осушения;
- 2) разуплотнение грунта в катодной зоне за счет электроосмотического увлажнения;

- 3) электрокоагуляция частиц, особенно в катодной зоне;
- 4) изменение рН в анодной и катодной зонах;
- 5) концентрирование у анода или катода определенных ионов вследствие их электрохимического переноса.

Согласно электронно-микроскопическим исследованиям изменения микроструктуры различных глинистых грунтов при электроосмосе, выполненным В. А. Королевым (2015), были выявлены следующие закономерности.

- 1) В анодной зоне микроструктура глины становится за счет электроосмотического осушения более плотной, крупные поры, занятые водой, практически отсутствуют, вместо них преобладают тонкие и мелкие поры, а микротекстура однородная.
- 2) В катодной зоне за счет электроосмоса формируется более рыхлая микроструктура, здесь видны крупные поры, занятые водой, а микротекстура становится псевдотурбулентной за счет миграции электроосмотического потока воды.

Так как в анодной зоне при электроосмосе создается кислая среда, а в катодной – щелочная, то меняется строение ДЭС вокруг частиц и, следовательно, изменяется микростроение грунтов в целом. Несмотря на это, глинистые грунты находятся в стесненных условиях, значит, они не могут свободно менять свою пространственную ориентацию., отсюда, основную роль в структурных преобразованиях грунтов при электроосмосе играет осушение анодной зоны и увлажнение катодной, а также электрохимические процессы, приводящие к изменению рН в этих зонах. Таким образом, воздействие постоянного электрического тока на грунты сопровождается существенными преобразованиями их свойств, микроструктуры и микротекстуры.

### **2.7. Опыт на образце кембрийских глин.**

Производилась поляризация образца постоянным током величиной 140 мА непрерывно в течение 44 суток.

При плотности тока равной 2,24 А/м<sup>2</sup> . Согласно поляризационным кривым для стали смещение потенциала в таком случае будет равным примерно -0,55. Учитывая



стандартный электродный потенциал стали (-0,55 В), измеренный относительно медносульфатного неполяризующегося электрода сравнения, общий поляризационный потенциал будет равен -1,1 В, это означает, что он находится почти на верхней границе интервала значений, установленных в ГОСТ 9.602- 2016.

- 1) После окончания поляризации образец глинистого грунта был вскрыт для изучения физико-механических характеристик.
- 2) Для контроля изменений электрических свойств образца в процессе эксперимента с периодичностью 1 раз в 10 суток выполнялись мониторинговые электрометрические измерения.

Профиль наблюдения длиной 32 см располагался на верхней горизонтальной поверхности образца, пикет 0 профиля находился в 2 см от катодного электрода, пикет 32 в 2 см от анодного электрода. Электрометрические измерения выполнялись вдоль профиля шагом 2 см с помощью четырехэлектродной установки АМNB, располагающейся ортогонально профилю. В каждой точке измерения 58 выполнялись замеры с тремя разносами питающей линии АВ. Параметры установок: MN=2см, АВ/2= 5;8;11 см. Измерения проводились с помощью электроразведочной аппаратуры «ЭРА-МАХ» стабилизированным низкочастотным переменным током на частоте 4.88 Гц. (Хомутильников, 2020).

Анализ изменения результатов электрометрического, а также мониторинга физического состояния и механических свойств грунта:

- 1) Всего было выполнено 5 циклов измерений, по результатам каждого цикла измерений был получен разрез кажущихся сопротивлений (КС).

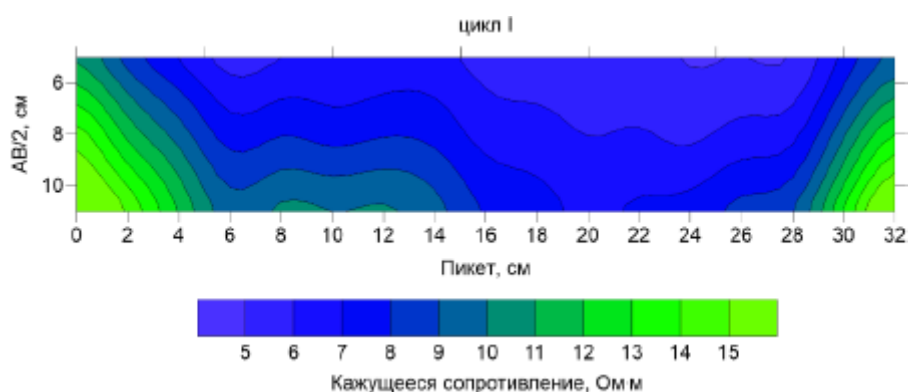


Рис. 4. Разрез кажущегося сопротивления для I цикла измерений (0 суток). (Хомутильников, 2020)

Для анализа изменений с течением времени кембрийских глин были рассчитаны относительные изменения КС (D) относительно опорного цикла I. Изменения сопротивления D (%) были рассчитаны по формуле:

$$D = \frac{K_{Ci} - K_{C1}}{K_{C1}} * 100\% \quad (15)$$

где  $K_{C1}$  – значения кажущегося сопротивления в I цикле;  $K_{Ci}$  – значения в последующих циклах (II, III, IV, V). На рисунке 6 представлены разностные разрезы D для всех циклов относительно опорного цикла I

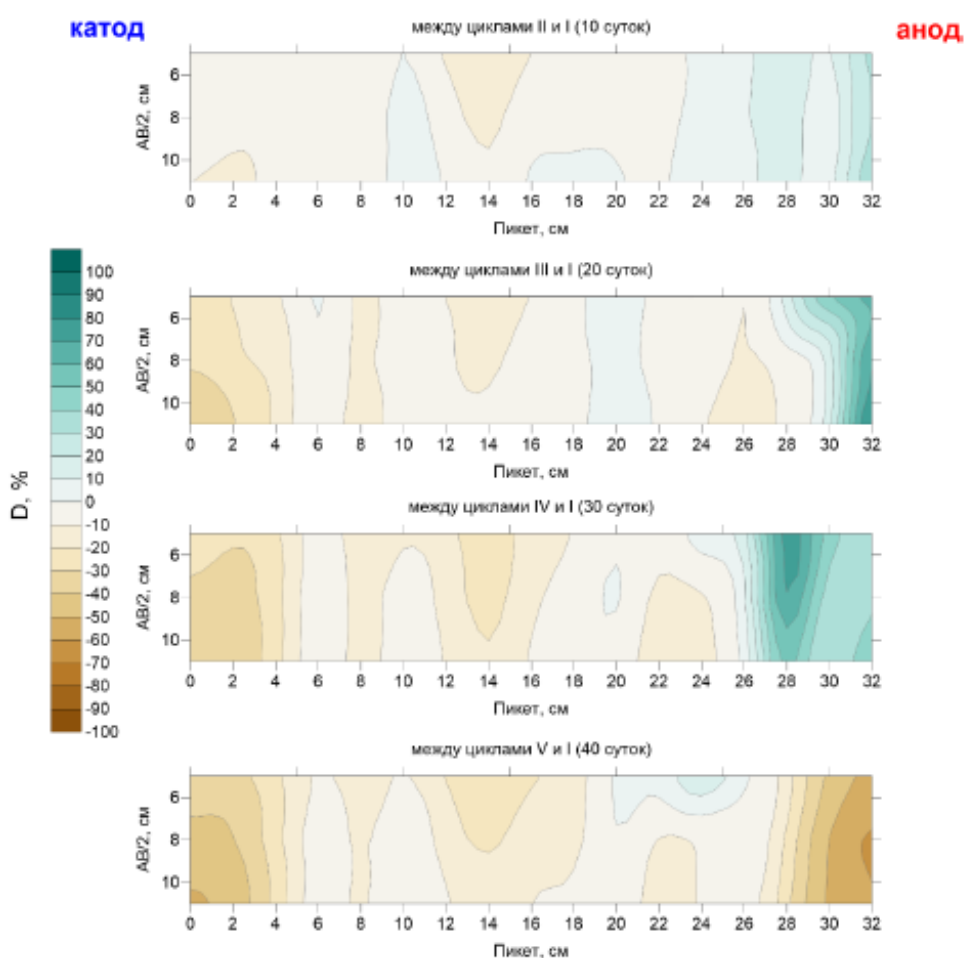


Рис. 5. Изменение кажущегося сопротивления D в ходе поляризации образца. (Хомутильников, 2020)

По данным измерений можно сделать следующие выводы:

- 1.1) В средней части профиля отмечается постепенное общее уменьшение КС от I цикла к V циклу, достигающее 20%.
- 1.2) Основные изменения касаются анодной и катодной областей. С I цикла до IV цикла в катодной области наблюдается снижение КС, в анодной области мы видим повышение КС, составляющее выше 60%.
- 1.3) Наибольшее изменения происходили на V цикле измерений, когда при продолжающемся снижении значений кажущегося сопротивления в области катода происходит резкое снижение КС и в области анода, так как произошло коррозионное разрушение анодного электрода на контакте с образцом, что стало причиной завершения поляризации образца.

Таким образом, физическое моделирование показало, что в результате катодной поляризации наблюдается значительное уменьшение значений удельного электрического сопротивления глинистых грунтов, что увеличивает их коррозионную агрессивность.

## **Выводы к главе 2**

1) В результате контакта твердой и жидкой фаз в глинистых грунтах образуется система зарядов, получившая название двойного электрического слоя (ДЭС);

2) Под действием электрического тока происходят электрокинетические явления, такие как: а именно электроосмос (перенос жидкости в глинистых грунтах под действием электрического тока) и электрофорез (движение заряженных частиц под действием электрического тока);

3) На электрокинетические явления оказывают влияние следующие факторы: минеральный состав грунта; дисперсность грунта; состав обменных катионов; влажность грунта; концентрация электролита порового раствора; водородный показатель рН; наличие микроорганизмов в грунте; температура; напряженность электрического поля;

4) В результате влияния электрокинетических явлений, и как следствие, процесс электрокоагуляции происходит изменение структуры и физико-механических свойств глинистых грунтов.

5) Моделирование прошлых лет показало, что в результате катодной поляризации наблюдается значительное уменьшение значений удельного электрического сопротивления глинистых грунтов, что увеличивает их коррозионную агрессивность.

## Глава 3. Основные результаты исследования

### 3.1. Основные результаты исследования на четвертичных песках.

С целью оценки изменения физико-механических свойств дисперсных грунтов под влиянием токов катодной защиты, были выполнены полевые работы в песках.

Озерные отложения ладожской трансгрессии ( $IH^3ld$ ) слагает равнины, террасы, береговые валы, прилегающие к побережью Ладожского озера, имеет довольно ограниченное распространение в виде широкой (от 2 до 7 км) полосы вдоль побережья Ладожского озера, имея абсолютные отметки высот от 4 до 15–17 м (Кямря, 2012). Озерные отложения подстилаются отложениями Балтийского ледникового озера, осташковской мореной и изредка погребенными торфяниками. Залегают осадки преимущественно с поверхности, но местами перекрыты болотными, эоловыми и аллювиальными образованиями. Отложения ладожской трансгрессии представлены песками и песчаными алевритами, в составе донных отложений преобладают глины, глинистые и алевритовые илы и сапропели. Остатки пресноводной диатомовой флоры приурочены в основном к донным глинам, илам и сапропелям. Трансгрессия Ладожского озера произошла несколько позднее  $3840 \pm 150$  лет. Мощность до 14 м (Вербицкий, 2012).

Участок проведения исследования и отбора образцов находится в СНТ «Маяк» Кировский район Ленинградской области. СНТ расположен вблизи Мурманского шоссе, недалеко от Ладожского моста. (рис. 6.)

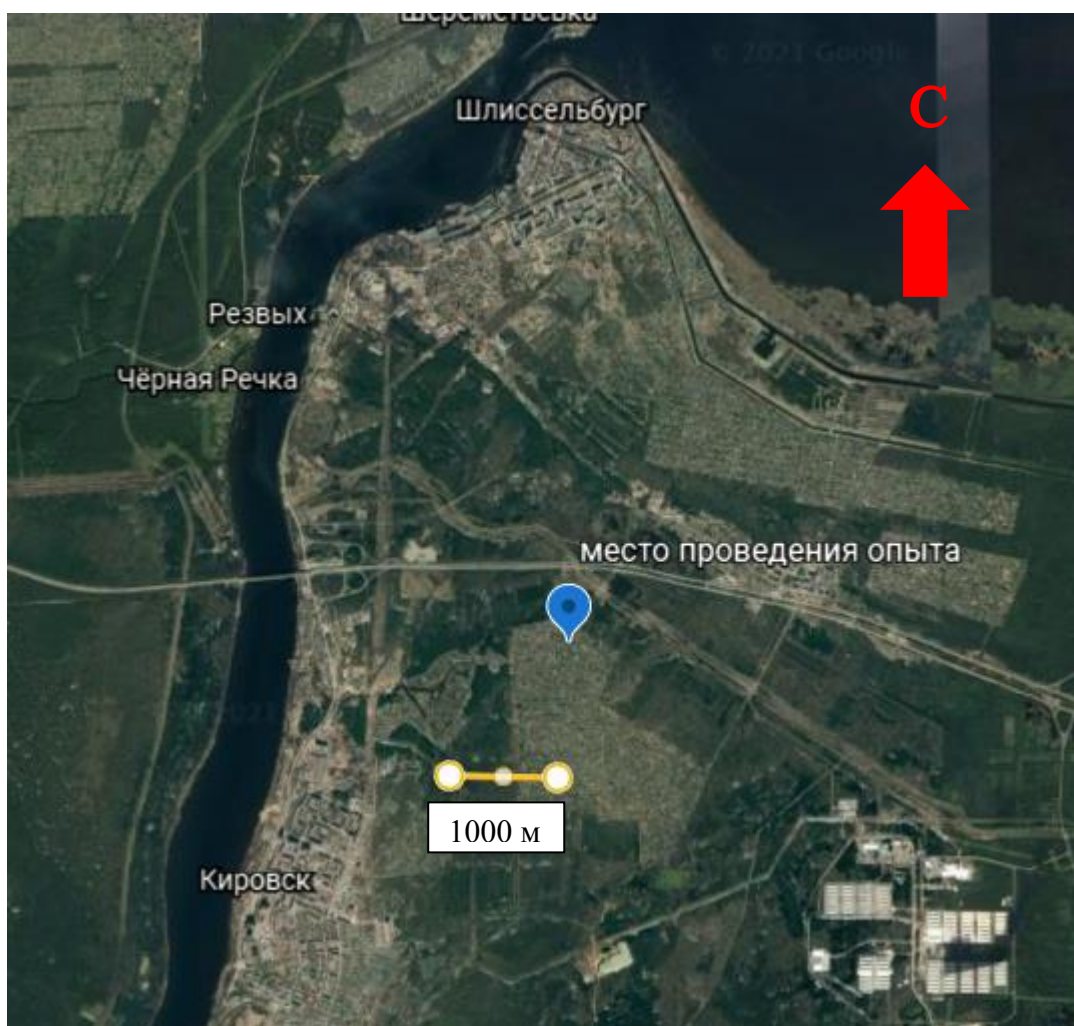


Рис.6. Местоположение проведения опыта (earth.google.com).

Опыт состоял из следующих этапов:

1) Сбор и запуск установки, моделирующей работу системы электрохимической защиты от коррозии, которая состояла из следующих элементов: два электрода (катод и анод), обработанные с одной стороны масляной краской, для лучшей изоляции. В качестве электродов использовались две стальные пластины одинакового размера 210x297 мм. Источник постоянного тока, с подаваемым напряжением в 80 мА в течении 45 дней. Электроды закапывались на расстоянии трёх метров друг от друга, на глубину 0,3 метров, так чтобы электроды были расположены в четвертичных

ОТЛОЖЕНИЯХ

ниже

растительного

слоя.



Фото. 1. Разбор установки.



Фото.2. Анод и катод после проведения опыта.

- 2) Отбор образцов до и после проведения опыта для дальнейших лабораторных испытаний.
- 3) Проведение лабораторных исследований.

Были определены следующие характеристики: гранулометрический состав ситовым и ареометрическим методами, влажность ( $W$ , %), Результаты исследований представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Гранулометрический состав грунта

<b>Размер частиц, мм</b>										
<b>Галька, щебень</b>	<b>Гравий, дресва</b>		<b>Песок</b>					<b>Пыль</b>		<b>Глина</b>
			<b>&gt;10</b>	<b>10-5</b>	<b>5-2</b>	<b>2-1</b>	<b>1-0,5</b>	<b>0,5- 0,25</b>	<b>0,25- 0,1</b>	
<b>Исходный грунт</b>										
-	-	0,03	0,42	1,57	4,06	12,18	64,34	5,28	9,25	2,64
<b>После окончания эксперимента (катодная зона)</b>										
-	-	0,06	1,12	2,30	2,45	12,23	63,47	7,62	1,91	8,58
<b>После окончания эксперимента (анодная зона)</b>										
-	-	0,09	1,56	3,39	4,33	18,91	59,33	3,20	7,47	1,07

Таблица 2

Влажность грунта

<b>№</b>	<b>Название</b>	<b><math>W_e</math></b>	<b><math>W_e(ср)</math></b>
1	<b>Исходный</b>	0,34	0,33
		0,32	
2	<b>Катод</b>	0,33	0,33
		0,33	
3	<b>Анод</b>	0,38	0,37
		0,36	



После проведения испытаний было отмечено, что влажность грунта у анодной и катодной зоны отличаются в незначительной степени, что доказывает предположение о слабом электроосмотическом процессе в песчаных грунтах (Королёв, 2015).

Также из таблицы... видно, что изменения в песчаных грунтах незначительны. Это связано с тем, что частицы песчаной размерности менее электрохимически активны и имеют отличные свойства от глинистых и пылеватых грунтов.

В катодной зоне, мы видим изменения гранулометрического состава в сторону глинистых частиц, и наоборот в анодной зоне гранулометрический состав изменился в сторону уменьшения глинистых частиц. Причиной изменений могут служить различные факторы, такие как: электроосмос, электрофорез, а также разложение и/или миграция органического вещества.

Также нельзя не отметить изменения в глинистой фракции, у грунта из анодной зоны, наблюдается сдвиг в сторону песчаной фракции — содержание частиц размера от 2 мм до 0,1 мм значительно возросло. У грунта катодной зоны видим уменьшение пылеватых частиц 0,01-0,002 мм, но рост фракции 0,05-0,01 мм. Предположительно, это произошло вследствие электрокоагуляции частиц.

Таким образом, поскольку в песчаных грунтах роль ДЭС не велика в отличие от глинистых грунтов, то песчаные грунты меняют свои свойства в значительно меньшей степени (Королёв, 2015).

### 3.2. Основные расчёты трубопровода «Южный поток».

Для расчёта первичных и вторичных электрических параметров, а также для расчета поляризионного потенциала вдоль трубопровода был выбран отрезок газопровода «ЮЖНЫЙ ПОТОК» от КС «Казачья» до ГКС «Русская».

#### Местоположение объекта

В административном отношении участки изысканий находятся в южной части Краснодарского края, на территории Крымского района, на землях администрации МО «Крымского район» и ГУ «Крымский лесхоз».

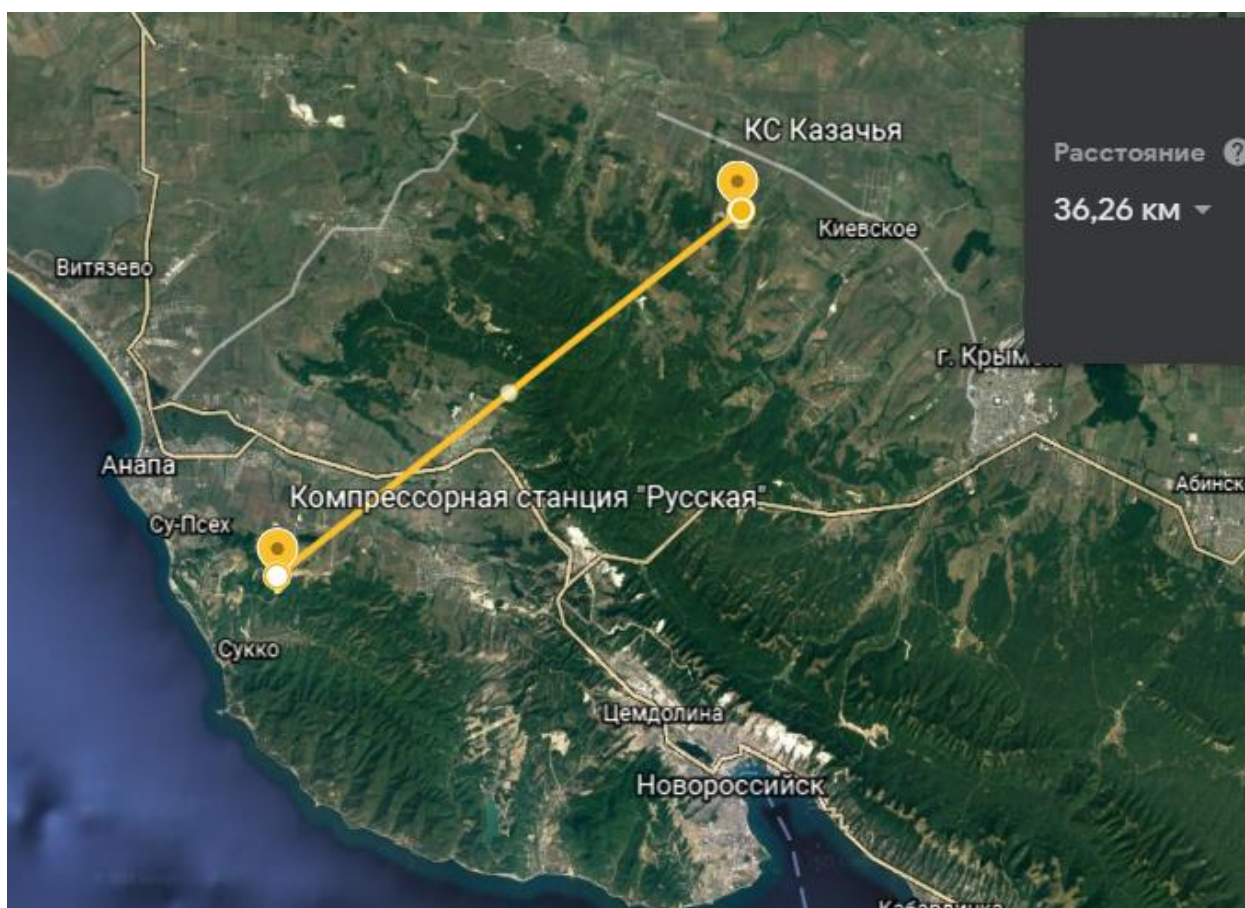


Рис.7. Примерное месторасположение газопровода «Южный поток». (earth.google.com).

Трасса газопровода пролегает в пределах низкогорного и холмистого эрозионнотектонического рельефа. В геоморфологическом отношении это область низких гор на неогеновых и палеогеновых складчатых и моноклиальных структурах. В низких горах преобладают отлогие склоны крутизной 10-20 градусов, которые спускаются к

широким долинам. Вершинные гребни или закруглены, или широкие, плоские. Абсолютные отметки на участке изысканий изменяются от 70 до 116 м.

Гидрографическая сеть в районе изысканий представлена реками Псебепс, Непиль, Шумайка, Гостагайка, Куматырь, Котлама, ручьями, протекающими по балкам. Кроме постоянно действующей речной сети имеются временные водотоки. Водный режим характеризуется прохождением паводков в осенне-зимний период и довольно устойчивой летней меженью. Источником питания для водотоков в основном служат атмосферные осадки.

Склоны гор, на которых расположены участки изысканий покрыты в основном лиственным лесом состоящим из граба, дуба, реже встречаются заросли боярышника, кизила, травянистая луговая растительность.

Из опасных природных процессов, отрицательно влияющих на условия строительства и эксплуатации газопровода наиболее опасным являются склоновые, гравитационные процессы, подтопление и затопление на участках прохождения через водные преграды.

### **Геологическое строение участка.**

Рассматриваемая территория располагается на юге Русской платформы. Регион представляет собой поднятие Большого Кавказа. Относится к эпигерцинской орогенной зоне, подзоне флишевого прогиба унаследованного типа (Новороссийский синклинорий). (Геология СССР том 46,1969)

Участок расположен на отрогах южного склона Северо-Западного Кавказа, которые в свою очередь расчленены балочными понижениями; распространены отложения неогеновой системы.

В разрезе, в сфере взаимодействия сооружения с геологической средой, до глубины 3,0-20,0 м принимают участие различные по литологии слои:

- Глины, суглинки и супеси различного происхождения и состояния, имеют самое широкое распространение;
- полускальные грунты распространены локально.

Четвертичные отложения представлены элювиальными и делювиальными грунтами, залегающими на неогеновых флишевых отложениях.

На участках, где в непосредственной близости к поверхности залегают коренные грунты, существенную роль приобретают продукты их разрушения – элювий. На изучаемой территории представлен гипергенный элювий, как результат процесса выветривания при постоянно положительных температурах и достаточном увлажнении. Отмечается характерная постепенная смена коренных грунтов на псевдообломочную зону с интенсивной глинизацией, преобразованием минерального и механического состава.

Делювиальные отложения, образованные в результате переотложения продуктов выветривания посредством атмосферных осадков, представлены маломощным чехлом на обоих склонах исследуемой территории.

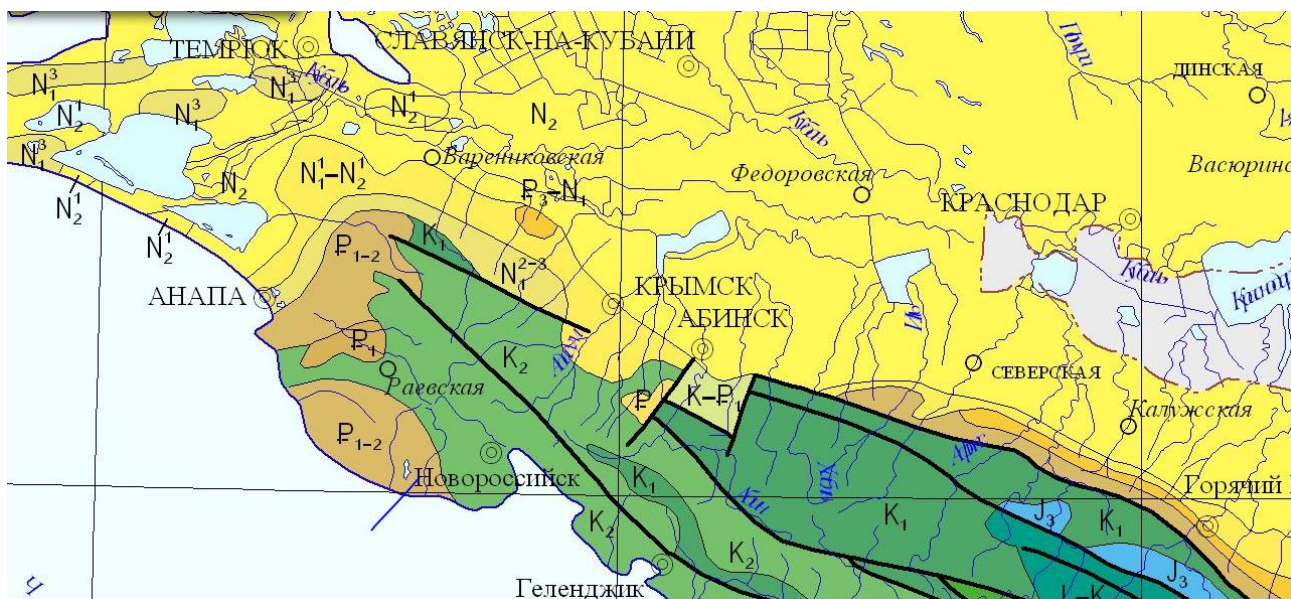


Рис.8. Фрагмент геологической карты участка.( webmapget.vsegei.ru)

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

НЕОГЕН	$N_1-Q$	Плиоцен - плейстоцен. Глины, пески с прослоями болотных мергелей, султаники, супеси (до 460 м)
	$N_2$	Плиоцен. Глины, алевролиты, пески, прослойки песчаников, известняков-ракушечников, мергелей, редко прослойки конгломератов (до 1040 м)
	$N_2^1$	Нижний плиоцен. Пески, песчанистые глины, с прослоями песчаников, известняков-ракушечников, мергелей, алевролитов, в основании редко конгломераты (до 300 м)
	$N_{1-2}$	Миоцен и плиоцен. Глины, пески, песчаники, известняки-ракушечники, конгломераты, прослойки алевролитов и мергелей, включения гравия и гальки (до 200 м)
	$N_1^1-N_2^1$	Нижний миоцен и нижний плиоцен. Глины с горизонтами мергелей, песчаников, доломитов, ракушечников (до 2350 м)
	$N_1^1-N_2^1$	Верхний миоцен - нижний плиоцен. Дилатомовые глины с галькой алевролитов и песчаников (до 300 м)
	$N_1^{1-3}$	Средний и верхний миоцен. Мергели, глины, известковистые глины (до 1150 м)
	$N_1^1$	Верхний миоцен. Глины, с прослоями песков, известняков, песчаников, мергелей, реже алевролитов (до 370 м)
	$N_1^{1-2}$	Нижний и средний миоцен. Глины с прослоями мергелей, известняков, песчаников, песков, алевролитов (до 1660 м)
	$N_1^2$	Средний миоцен. Глины с прослоями песков, мергелей, известняков, алевролитов и песчаников, местами с прослоями конгломератов (до 340 м)
	$N_1^1$	Нижний миоцен. Глины с пиритовыми и сидеритовыми конкрециями, с прослоями алевролитов и песчаников, редко прослойки органогенно-обломочных известняков (до 1100 м)
	ПАЛЕОГЕН	$P_3-N_1$
$P$		Глины, алевролиты, мергели, прослойки песчаников, известняков (до 2100 м)
$P_3$		Олигоцен. Глины с прослоями известняков, мергелей, песков, алевролитов, песчаников (до 350 м)
$P_2$		Эоцен. Глины, мергели, алевролиты, известняки (до 450 м)
$P_{1-2}$		Палеоцен-эоцен. Глины, мергели, песчаники, редко прослойки известняков, алевролитов (до 770 м)
$P_1$		Палеоцен. Алевролиты, песчаники, глины, мергели (до 100 м)
$K-P_1$		Мел - палеоцен. Известняки, доломиты, мергели, глины, аргиллиты, прослойки алевролитов (до 500 м)
$K_2-P_1$		Верхний мел - палеоцен. Известняки, мергели (до 1000 м)










МЕЛ	$K$	Мергели серые с прослоями известняков, аргиллиты, песчаники, алевролиты (до 2120 м)
	$K_2$	Верхний отдел. На северном склоне - известняки, мергели, алевролиты (до 430 м), на южном - аргиллиты, алевролиты, туфоизвестняки, базальты, их туфы, мергели (до 2220 м)
	$K_{1-2}$	Нижний и верхний отделы. Песчаники, известняки, мергели, аргиллиты (до 1100 м)
	$K_1$	Нижний отдел. На северном склоне - песчаники, алевролиты, глины с прослоями аргиллитов, конгломератов, известняков, мергелей (до 4100 м), на южном - песчаники, известняки, мергели, аргиллиты с прослоями конгломератов (до 1800 м)
	$J_3-K_1$	Верхняя юра - нижний мел. Аргиллиты, песчаники, алевролиты, мергели, известняки, редко конгломераты (до 2810 м)
ЮРА	$J_3$	Верхний отдел. Известняки рифогенные, органогенно-обломочные, оолитовые, в основании базальты конгломераты (до 450 м)
	$J_{2-3}$	Средний и верхний отделы. Известняки, песчаники, алевролиты, аргиллиты, прослойки мергелей, редко конгломератов (до 750 м)
	$J_2$	Средний отдел. Аргиллиты с отдельными прослоями песчаников и сидеритов (более 1500 м)
	$J_{1-2}$	Нижний и средний отделы. Чередование аргиллитов, алевролитов, с прослоями песчаников и криноидных известняков, реже прослойки конгломератов, туфы риадашитов (до 5100 м)
	$J_1$	Нижний отдел. Аргиллиты с прослоями песчаников, алевролитов, реже известняков, в основании разреза иногда конгломераты (до 1030 м)
	$T$	Триас. Известняки и аргиллиты с прослоями гравелитов и песчаников, реже конгломератов (до 1450 м)
	$PZ$	Палеозой. Фидлиты, кварц-серицит-хлоритовые и эпидот-хлоритовые сланцы, метапесчаники, прослойки известняков (до 670 м)
	$C_{2-3}$	Карбон. Средний и верхний отделы. Конгломераты, гравелиты, песчаники, редкие прослойки алевролитов (до 870 м)
	$PZ_2$	Средний палеозой. Гнейсы, слюдяные сланцы, амфиболиты, единичные прослойки конгломератов и мраморов (более 3000 м)
	$PR$	Протерозой. Гнейсы, порфириобластовые слюдяные сланцы, амфиболиты, редкие прослойки кварцитов (более 3500 м)

$gJ_2$  Габбро, габбро-диориты

$\gamma C$  Граниты

$\gamma \delta C_1$  Гранодиориты

$gPR$  Серпентинизированные гипербазиты

-  Геологические границы
-  Основные разрывные нарушения
-  КРАСНОДАР Города - административные центры
-  Хадзыженск Города
-  Старовишск Поселки - административные центры
-  Ясенская Прочие населенные пункты
-  Гидросеть, береговая линия
-  Граница государственная
-  Граница субъектов Российской Федерации

Цифрами на карте обозначены: 1 - Украина

В геологическом строении исследуемых участков до изученной глубины 20 м выделены следующие стратиграфо-генетические комплексы:

- **комплекс современных отложений**, представленный почвой суглинистой edQ<sub>IV</sub>;
- **комплекс верхнечетвертичных-современных делювиальных отложений (dQ<sub>III-IV</sub>)**, представленный суглинками бурыми, темно-бурыми, желтовато-бурыми, пятнами – опесчаненные, с дресвой, остатками растений, с гнездами карбонатов, с тонкими (3-4 см) прослоями песчаника очень низкой прочности, выветрелого до состояния дресвы и песка.
- **комплекс верхнечетвертичных-современных элювиальных отложений (eQ<sub>III-IV</sub>)**, представленный глинами светло-серыми, слоистыми, в прослоях - опесчаненными, трещиноватыми, по трещинам ожелезнение и налет порошковатых карбонатов, по наслоению - присыпки песка бурого и серого цвета, местами с обломками раковин, реже – в кровле с корнями растений, суглинками желтовато-серыми, с линзами песка, с тонкими (3-4 см) прослоями песчаника очень низкой прочности, супесями светло-серыми, желтовато-серыми, твердыми (выветрелый песчаник) и песчаника очень низкой прочности светло-серого, выветрелого. (Отчет, 2013)

На основании выделенных стратиграфо-генетических комплексов на изученном оползнеопасном участке до глубины 20,0 м выделено 7 инженерно-геологических элементов (ИГЭ) и слой 1. Инженерно-геологические разрезы на участке работ представлены в приложениях 1 и 2.

Слой-1. Почва суглинистая, твердая, пылеватая, мощностью до 0,4 м.

Ввиду невыдержанной и малой мощности почв при настоящих изысканиях их свойства не изучались.

ИГЭ-d18. Суглинок тяжелый песчанистый, твердый, мощностью 0,9 - 4,0 м;

ИГЭ-d19. Суглинок тяжелый пылеватый, твердый, мощностью 1,0 - 7,9 м;

ИГЭ-e10. Супесь песчанистая, твердая, мощностью 0,8 – 6,0 м;

ИГЭ-e19. Суглинок тяжелый песчанистый, твердый, мощностью 0,4 – 9,2 м;

ИГЭ-e29. Глина легкая пылеватая, твердая, с примесью органических веществ, мощностью 0,4 – 19,8 м;

ИГЭ-e29а. Глина легкая пылеватая, полутвердая, мощностью 1,2 – 7,2 м;

ИГЭ-е42в. Песчаник глинистый, средней прочности, рыхлый, размягчаемый, мощностью 0,6 - 3,6 м.

### Расчет первичных электрических параметров трубопровода

- 1) Расчет продольного сопротивления трубы  $R_T$ , Ом/м

$$R_T = \frac{\rho_T}{\pi * (D_T - \sigma_T) * \sigma_T} \quad (16)$$

Где  $\rho_T$  – удельное электрическое сопротивление материала трубы, Ом\*м (определяют в зависимости от марки стали и температуры по таблицам, если данные о марке стали отсутствуют, принимают равным  $2,45 * 10^{-7}$  Ом\*м);  $D_T$  – наружный диаметр трубы, м.;  $\sigma_T$ -толщины стенки трубы, м.

- 2) Расчет переходного сопротивления трубопровода

$$R_{ПЛ} = R_{изЛ} + R_{pL} \quad (17)$$

$$R_{изЛ} = \frac{R_{из}}{\pi * D_T} \quad (18)$$

Где  $R_{изЛ}$ - сопротивление защитного покрытия трубопровода на метр длины, Ом\*м;  $R_{pL}$  - сопротивление растеканию трубопровода на метр длины, Ом\*м.

- 3) Сопротивление растеканию трубопровода  $R_{pL}$  вычисляют по трансцендентному уравнению.

$$R_{pL} = \frac{\rho_r}{\pi * 2} * \ln \frac{0,4 * R_{pL}}{D_T^2 * h_r * R_T}, \text{ Ом * м} \quad (19)$$

Где  $\rho_r$  – удельное электрическое сопротивление грунта;  $h_r$  – глубина заложения трубопровода (от поверхности земли до верхней образующей трубы), м.

### Расчет вторичных электрических параметров трубопровода

- 1) Расчет постоянной распространения тока по трубопроводу  $\alpha$ .

Постоянную распространения тока по трубопроводу  $\alpha$  вычисляют по формуле:

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_{tL}}{R_{nL}}}, \frac{1}{\text{м}} \quad (20)$$

2) Расчет волнового сопротивления трубопровода  $Z_V$ .

$$Z_V = \sqrt{R_{tL} * R_{nL}} \quad (21)$$

3) Расчет входного сопротивления трубопровода  $Z_{ВХ}$

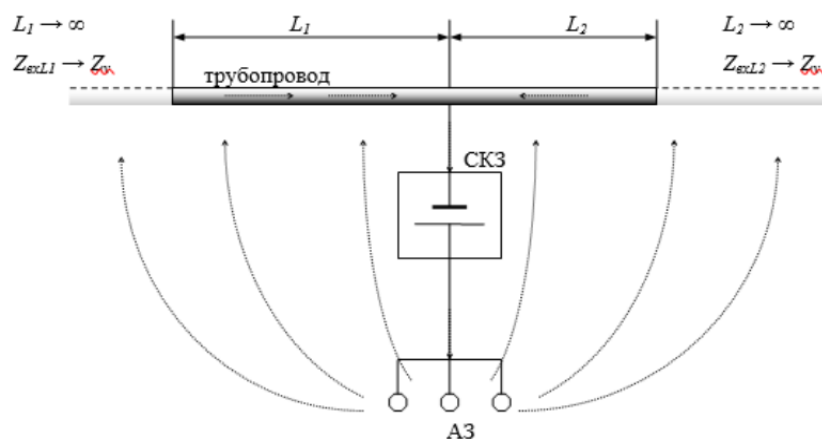


Рис.9. Схема трубопровода.

-справа и слева от точки дренажа плечи трубопровода можно считать бесконечными:

$$Z_{ВХ} = 0,5 * Z_V; \quad (22)$$

$$Z_{ВХL1} = Z_V * \text{cth}(\alpha * L_1); \quad (23)$$

$$Z_{ВХ2L} = \frac{Z_{ВХL1} * Z_{ВХL2}}{Z_{ВХL1} + Z_{ВХL2}}; \quad (24)$$

Величина входного сопротивления трубопровода в значительной степени определяет силу тока установки катодной защиты. С увеличением  $Z_{ВХ}$  сила тока катодной установки уменьшается.

### Расчет основных параметров УКЗ

1) Силу тока  $I$  установки катодной защиты для достижения защитного потенциала в точке дренажа УКЗ  $U_{\max}$ :

$$I_{УКЗ} = \frac{U_{\max}}{Z_{ВХ}}; \quad (25)$$

2) Выходные напряжения УКЗ будет определяться исходя из тока УКЗ и полного сопротивления цепи:

$$U_{УКЗ} = I_{УКЗ} (Z_{ВХ} + R_{пр} + R_3); \quad (26)$$



Где  $Z_{вх}$ -входное сопротивление трубопровода в точке дренажа, Ом;

$R_{пр}$  – сопротивление дренажной линии, соединяющей установку катодной защиты с трубопроводом и анодным заземлением, м;

$R_3$  – переходное сопротивление анодного заземления, Ом.

3) Выходную мощность катодной станции  $P$  вычисляют по формуле:

$$P = U_{УКЗ} * I_{УКЗ}; (27)$$

4) Длину плеча защитной зоны  $L_3$ , м вычисляют по формуле:

$$L_3 = \frac{1}{\alpha} * \ln \frac{U_{max}}{U_{min}}; (28)$$

5) Количество установок катодной защиты  $N$ , необходимое для защиты трубопровода длиной  $L$ , м, вычисляют по формуле:

$$N = \frac{L}{2L'}, \text{ шт}$$

#### **Расчет распределения потенциала вдоль трубопровода от точки дренажа**

1) Потенциал  $U_0$  в точке дренажа УКЗ (установка катодной защиты) будет определяться током УКЗ и входным сопротивлением трубы, также на него будет оказывать влияние потенциал АЗ (анодное заземление)  $U_{az}$ .

$$dU = U_t + U_{az}; (29)$$

$$U_{az} = \frac{I * \rho}{2\pi\sqrt{Y^2 * X^2}}; (30)$$

$$U_t = U_0 \frac{ch[\alpha * (L - x)]}{ch(\alpha * L)} (31)$$

Где  $I$ -сила тока,  $\rho$ - удельное электрическое сопротивление грунта  $Y$ -расстояние от АЗ до трубы (перпендикуляр),  $X$ -длина трубопровода от точки дренажа.

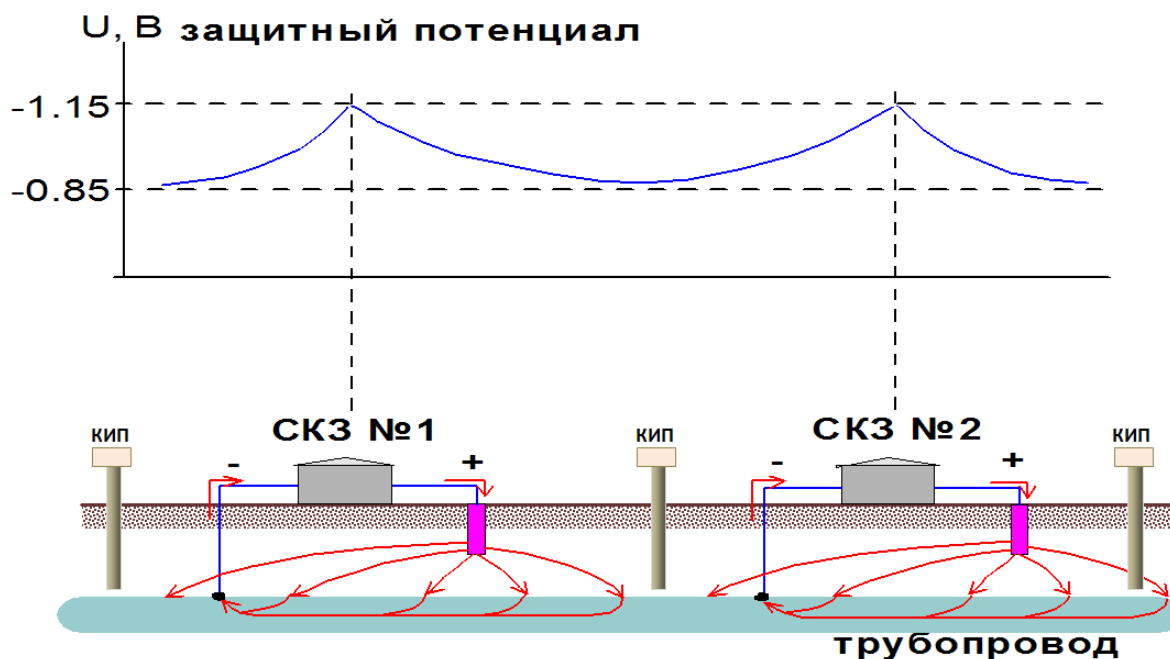


Рис. 10. Электрохимическая защита от коррозии магистрального трубопровода. (Бурлуцкий, 2020).

#### Расчет поляризационного потенциала вдоль трубопровода от точки дренажа.

- 1) Поляризационный потенциал определяется на дефекте в покрытии, размером 2,5x2,5 см, а эквивалентный диаметр  $d$  дефекта определяется по формуле:

$$d = 2 * \sqrt{\frac{S_d}{\pi}}, \quad (32)$$

где  $S_d$ -площадь дефекта.

- 2) Сопротивление растеканию дефекта:

$$R_d = \frac{\rho}{2d} \quad (33)$$

- 3) Нормированное сопротивление растеканию дефекта:

$$R_{d,2} = R_d * S_d \quad (34)$$

Для определения поляризационного потенциала необходимо добиться равенства:

$$dU = U_t + U_{az} = dU' = U_d + dU'_p, \quad (35)$$

где  $U'_d = R_{d,2} * j'$  - омическое падение напряжение на дефекте,  $j'$  - плотность тока на дефекте, которую необходимо подобрать чтобы соблюдалось равенство  $dU = dU'$ . (Яблунский А.И., 2018)

Катодные поляризационные кривые стали  
при различном удельном сопротивлении земли  $\rho$ , Ом·м (индекс кривых)

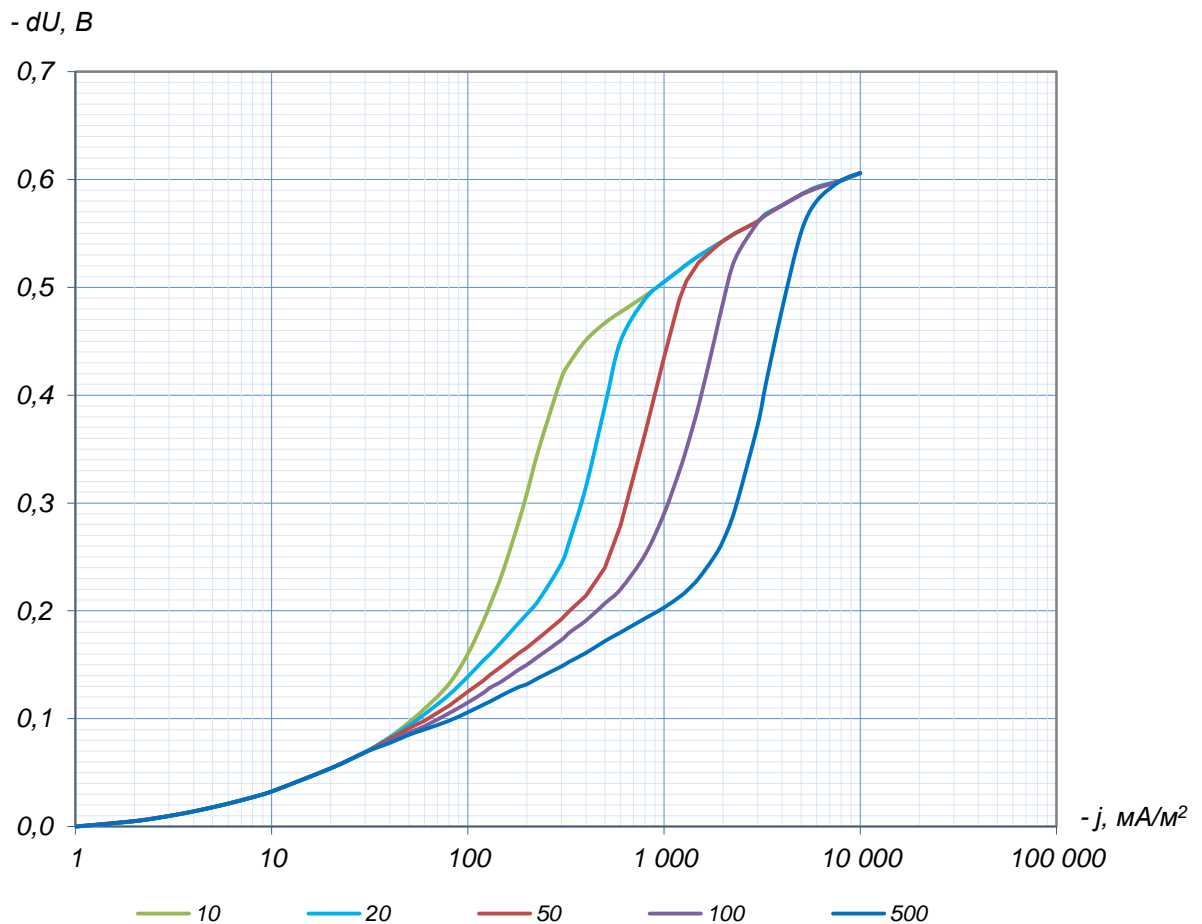


Рис. 11. Катодные поляризационные кривые стали при различном удельном сопротивлении грунта  $\rho$ . (Яблучанский, 2018).

Расчеты параметров УКЗ проводились для двух различных удельных сопротивлений грунта. Первый расчет для среднего начального неизменённого грунта на трубопроводе, который составлял 26 Ом\*м. Второй расчёт проводился для изменённого в ходе работы УКЗ при удельном сопротивлении 10 Ом\*м. Данные изменения произошли вследствие действия постоянного тока УКЗ на грунт. Удельные сопротивления изменяются в несколько раз, что было отражено в работах прошлых лет Яблучанского и Хомутицкого в 2018, 2020 годах соответственно.

### Результаты расчётов на трубопроводе «Южный поток»

- 1) Результаты расчета первичных электрических параметров трубопровода (См.таблицу 3)

Таблица 3

	$\rho_r=26 \text{ Ом*м}$	$\rho_r=10 \text{ Ом*м}$	Ед.измер.
$\rho_r$	$2,4*10^{-7}$	$2,4*10^{-7}$	Ом*м
$D_r$	1,2	1,2	м
$\sigma_r$	0,003	0,003	м
$\rho_r$	26	10	Ом*м
$h_r$	2	2	м
$R_r$	$2,17*10^{-5}$	$2,34*10^{-4}$	Ом/м
$R_{из}$	$3,0*10^5$	$3,0*10^5$	Ом*м <sup>2</sup>
$R_{изL}$	$7,96 *10^4$	$7,96 *10^4$	Ом*м
$R_{pL}$	52,7	18,61	Ом*м
$R_{пЛ}$	$7,97*10^4$	$7,96 *10^4$	Ом*м

- 2) Результаты расчета вторичных электрических параметров трубопровода (См.таблицу 4)

Таблица 4.

	$\rho_r=26 \text{ Ом*м}$	$\rho_r=10 \text{ Ом*м}$	Ед.измер.
$\alpha$	$1,65*10^{-5}$	$1,65*10^{-5}$	1/м
$Z_v$	1,32	1,32	Ом
$Z_{вх}$	0,66	0,66	Ом
$Z_{вх1}$	0,49	0,49	Ом
$Z_{вх2}$	0,49	0,49	Ом
$Z_{вх2L}$	0,25	0,25	Ом

- 3) Результаты расчет основных параметров УКЗ, при условии стального трубопровода (См. таблицу 5)

Таблица 5

	$\rho_r=26 \text{ Ом*м}$	$\rho_r=10 \text{ Ом*м}$	Ед.измер.
$U_{max}$	0,6	0,6	В
$U_{min}$	0,3	0,3	В
$Z_{вх}$	0,66	0,66	Ом
$I_{укз}$	0,912	0,912	А
$U_{укз}$	2,42	2,42	В
$P$	2,21	2,21	Вт
$L_3$	41972	41972	м
$L$	47500	47500	м
$N$	0,6	0,6	шт

4) Результаты расчета распределения потенциала вдоль трубопровода в точке дренажа. (См. таблицу 6)

Таблица 6

	$\rho_r=26 \text{ Ом*м}$	$\rho_r=10 \text{ Ом*м}$	Ед.измер.
$I_{skz}$	-1,5	-1,5	А
$Z_{bx}$	0,66	0,66	Ом
$U_0$	-0,99	-0,99	В
$Y_{az}$	300	300	м
$X$	0	0	м
$L$	23750	23750	м
$\rho_r$	26	10	Ом*м
$\alpha$	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$1,65 \cdot 10^{-5}$	
$U_{az}$	-0,02	-0,01	В
$U_t$	-0,99	-0,99	В
$dU$	-1,01	-0,99	В

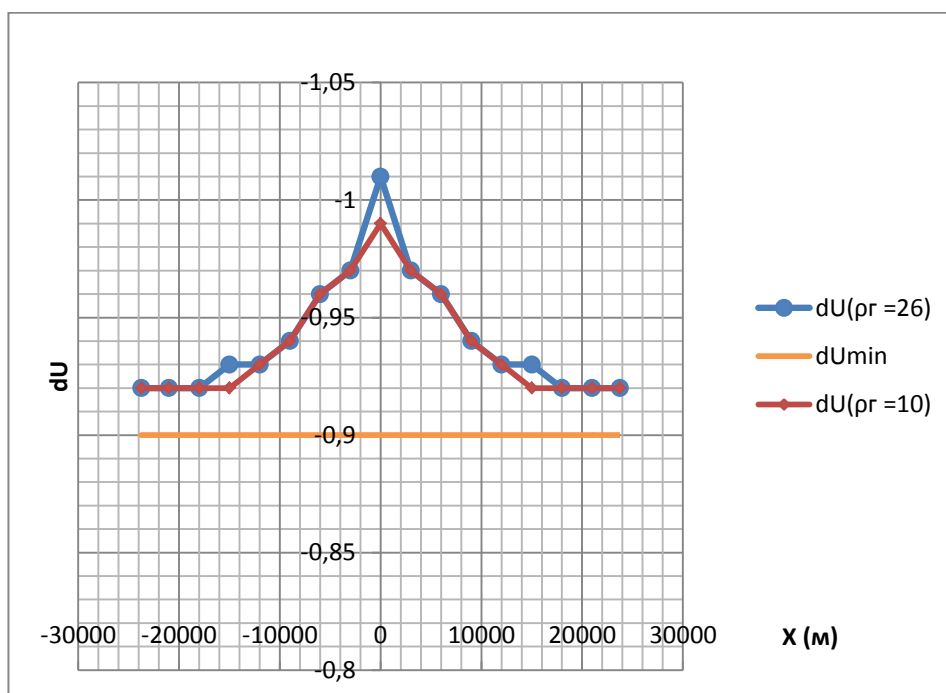


График.1. Зависимость распределения потенциала вдоль трубопровода от точки дренажа.

5) Результаты расчета поляризационного потенциала вдоль трубопровода в точке дренажа. (См. таблицу 7).

После выхода ГОСТ Р 51164-98, требующего контроль параметров катодной защиты на подземных осуществлять только по поляризационным потенциалам  $U_p$ , диапазон значений которых определен в довольно узком диапазоне  $-0,85 \div -1,15$  В. (Яблучанский, 2018)

Таблица 7.

	$\rho_r=26 \text{ Ом*м}$	$\rho_r=10 \text{ Ом*м}$	Ед.измер.
$S_d$	0,00063	0,00063	$\text{м}^2$
$d$	0,028	0,028	м
$R_d$	460,7	177,2	Ом
$R_{d,2}$	0,29	0,11	$\text{Ом*м}^2$
$dU'$	<b>-0,91</b>	<b>-0,99</b>	<b>В</b>
$j'$	1650	3800	$\text{мА/м}^2$
$dU_p'$	-0,53	-0,57	В
$U_p$	<b>-1,08</b>	<b>-1,12</b>	<b>В</b>
$dU$	<b>-1,01</b>	<b>-0,99</b>	<b>В</b>

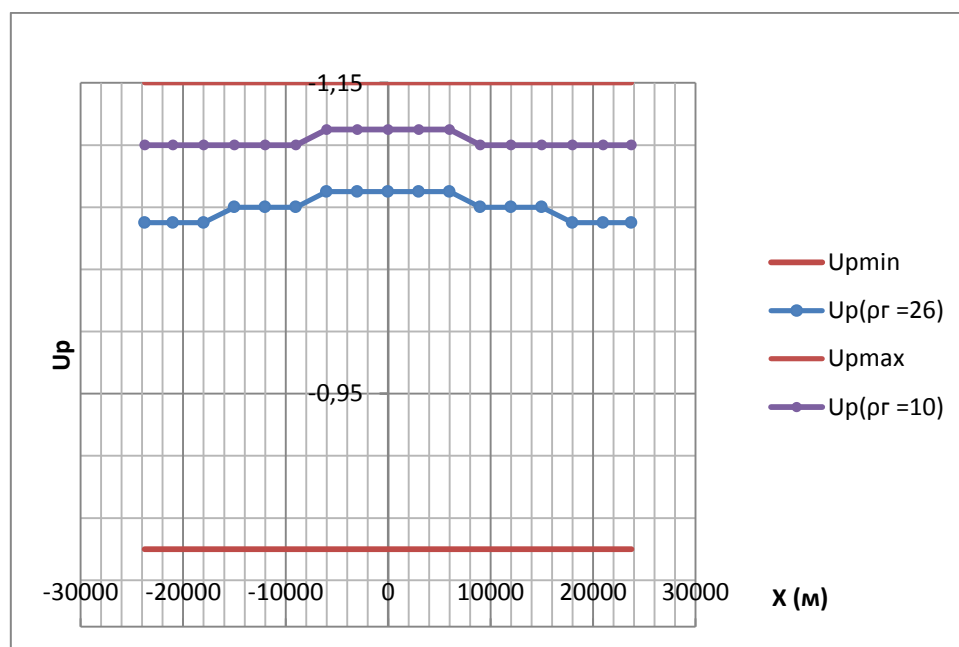


График.2. Зависимость поляризационного потенциала вдоль трубопровода от точки дренажа.

Исходя из расчётов, можно сделать выводы, что  $R_{pL}$  (сопротивление растеканию трубопровода на метр длины) уменьшается с уменьшением удельного сопротивления грунта. Также на графике 1 видно, что происходит незначительное уменьшение  $U_d$  (смещение потенциала в точке X на трубопроводе). На графике 2 видно значительное изменение поляризационного потенциала, однако, по ГОСТу Р 51164-98 поляризационный потенциал не выходит за рамки допустимого изменения.

### Выводы к главе 3

- 1) В результате проведённых полевых испытаний на четвертичных песках доказано, что изменения физико-механических свойств незначительны при действии постоянного тока установки катодной защиты.
- 2) При расчётах электрических показателей газопровода «Южный поток» при разных удельных сопротивлениях, наблюдается смещение поляризационного потенциала к наименьшей границе. Данные показатели поляризационного потенциала вписываются в рамки ГОСТа Р 51164-98, но произошло смещение поляризационного потенциала, не выходящее за рамки  $-0,85 \text{ В} - -1,15 \text{ В}$ , но данное смещение говорит о том, что если удельное сопротивление грунта уменьшится ещё больше, то это может привести к коррозионному разрушению трубопровода.
- 3) Также стоит учитывать, что в исследованиях прошлых лет было выделено, что при длительном влиянии постоянного тока катодной защиты происходит изменения удельного сопротивления грунтов, как показано выше, это непосредственно влияет на увеличение их коррозионной активности, приводит к изменению поляризационного потенциала, что на данный момент не учитывается при эксплуатации подземных сооружений.

## Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для предотвращения подземной коррозии применяют УКЗ (установки катодной защиты), которые используют постоянный электрический ток большой плотности.
2. При действии постоянного электрического тока происходят электрокинетические процессы, такие как электроосмос и электрофорез, которые возникают из-за наличия ДЭС (двойного электрического слоя).
3. Под действием постоянного тока УКЗ происходят различные изменения грунта, такие как: изменение структуры и изменения физико-механических свойств, особенно ярко данные процессы проявляются в глинистых грунтах.
4. После поляризации свойства глинистых грунтов резко изменились, в противовес этому, в песчаных грунтах изменения были незначительны, это связано непосредственно со структурой грунта. В глинистых грунтах произошли изменения во влажности, удельном электрическом сопротивлении, плотности, пористости и водородном показателе pH, который увеличивает коррозионную агрессивность грунта.
5. При расчётах электрических показателей газопровода «Южный поток» при разных удельных сопротивлениях, наблюдается смещение поляризационного потенциала к наименьшей границе. Данные показатели поляризационного потенциала вписываются в рамки ГОСТа Р 51164-98, но произошло смещение поляризационного потенциала, не выходящие за рамки  $-0,85 \text{ В}$  -  $-1,15 \text{ В}$ , но данное смещение говорит о том, что если удельное сопротивление грунта уменьшится еще больше, то это может привести к коррозионному разрушению трубопровода.
6. Таким образом, с течением времени под действием постоянного тока установки катодной защиты, происходит изменение физико-механических свойств глинистых грунтов, а также изменения в удельном сопротивлении, что приводит к увеличению коррозионной агрессивности. Подобные изменения стоит учитывать при дальнейшей эксплуатации подземных сооружений, так как данные изменения значительно отличаются от исходного грунта.

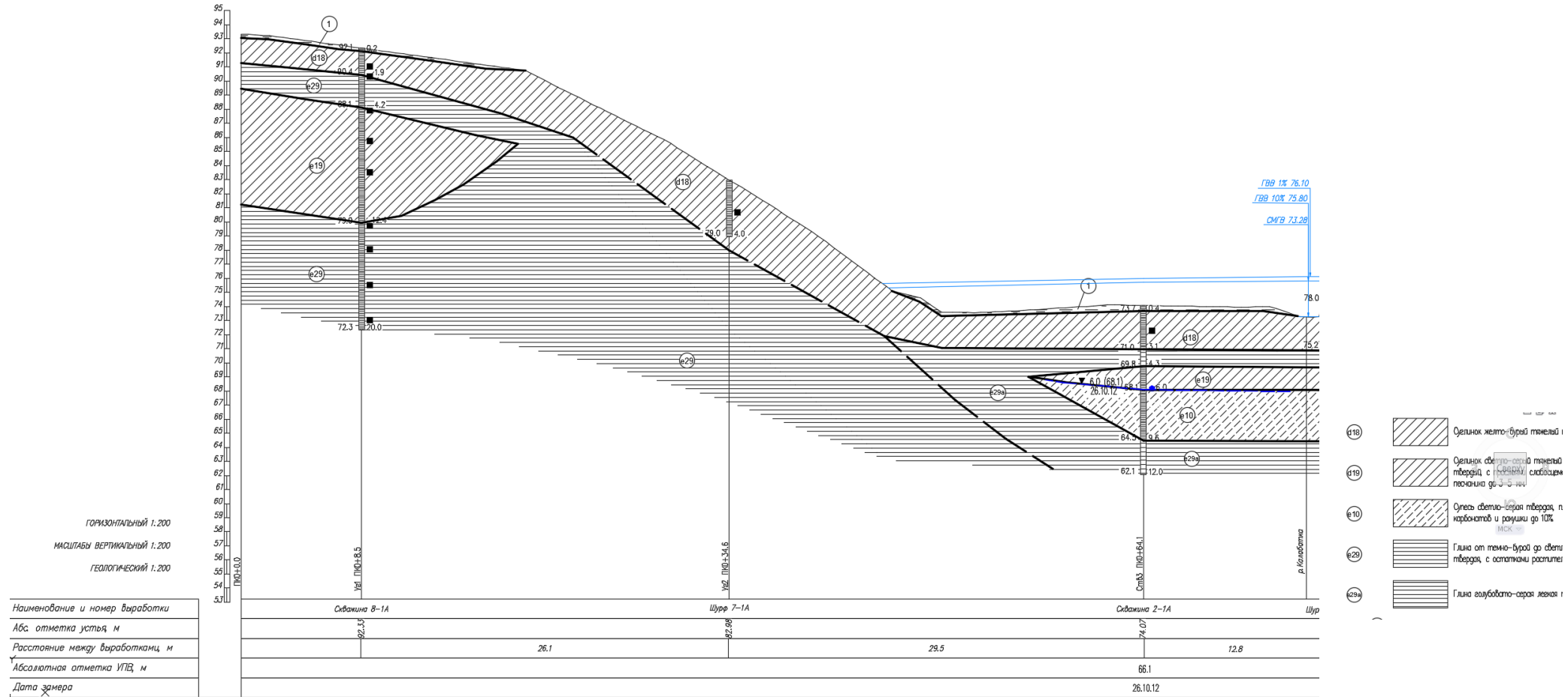


## Список литературы

1. Бурлуцкий С.Б. , Еремеева А.А. Коррозия и защита от коррозии конструкционных материалов и сооружений. Учебное пособие: СПбГУ, ИНоЗ, кафедра грунтоведения и инженерной геологии, - Санкт-Петербург, 2020 – 37 с.
2. . Бэкман В., Швенк В. Катодная защита от коррозии. Справочник: Пер. с нем. / Под ред. А. В. Стрижевского. – М.: Металлургия, 1984. – 496 с.
3. Геология СССР. Том 46. Ростовская, Волгоградская, Астраханская области и Калмыцкая АССР. Геологическое описание под редакцией А.В. Сидоренко– М. Недра, 1970 г. 666 с.
4. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
5. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
6. ГОСТ 23740-2016 Грунты. Методы определения содержания органических веществ
7. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
8. ГОСТ 9.005-72 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами.
9. ГОСТ 9.602.2016 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии
10. ГОСТ Р 51164-98 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии
11. Грунтоведение / Трофимов В. Т., Королев В. А., Вознесенский Е. А., Голодковская Г. А., Васильчук Ю. К., Зиангиров Р. С., Под ред. В. Т. Трофимова. – М.: Издательство МГУ, 2005. 1024 с.
12. Дашко, Р.Э. Геотехническая диагностика коренных глин Санкт-Петербургского региона (на примере нижнекембрийской глинистой толщи). / Р. Э. Дашко // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2000. - № 1. - С. 95-100.
13. Дашко, Р.Э. Геотехнические аспекты исследований нижнекембрийских синих глин Санкт-Петербурга как основания сооружений./ Р.Э. Дашко, А.А. Коробко // Жилищное строительство.- 2014. - №9. – С.19-22.
14. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.
15. Злочевская Р. И., Королев В. А. Электроповерхностные явления в глинистых породах. – М.: Издательство МГУ, 1988. – 177 с.

16. Королёв В. А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. – М.: Издательство МГУ, 2015. 468 с.
17. Кузнецов С.С. О возможной структуре в долине реки Тосна у с. Никольского. - Л.: Вестник ЛГУ, 1974, № 6, вып. 1. - С. 42 - 46.
18. Ломтадзе, В.Д. Физико-механические свойства нижнекембрийских глин Северо-Западной окраины Русской платформы / В.Д. Ломтадзе // Записки Горного Института. – 1958 г., Т. 34, Вып. 2. – С.154-188.
19. Отчет: «Расширение ЕСГ для обеспечения подачи газа в газопровод «Южный поток» 1-й этап (западный коридор), для обеспечения подачи газа в объеме Южно-Европейский газопровод. Участок «Писаревка – Анапа», км 768,5 – км 817. – «ГИПРОСПЕЦГАЗ», 2013.
20. Подгорный А. А. Защита подземных металлических трубопроводов от коррозии. – К.: Будівельник, 1988. – 176 с.
21. Притула В. В. Подземная коррозия трубопроводов и резервуаров. – М.: Акела, 2003. – 225 с.
22. Улиг Г. Г., Ревы Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику: Пер. с англ. / Под ред. А. М. Сухотина. – Л.: Химия, 1989. – Пер. изд., США, 1985. – 456 с.
23. Хомутильников С.А. Оценка влияния постоянных токов системы электрохимической защиты трубопроводов от коррозии на свойства дисперсных грунтов. Выпускная квалификационная работа, Санкт-Петербург, 2020.
24. Яблучанский П.А. Обоснование мероприятий по защите подземных нефтегазопроводов от коррозионного воздействия высоковольтных линий электропередачи переменного тока. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург, 2014.
25. Яблучанский А.И. О выборе установки катодной защиты трубопровода при разработке проектных решений, ООО «Газпром проектирование» Санкт-Петербургский филиал, 2018.
26. Google Earth Pro
27. <http://webmapget.vsegei.ru/index.html>

Приложение 1. Инженерно-геологический разрез на участке работ.



Приложение 2. Инженерно-геологический разрез на участке работ.

